www.scichina.com

tech.scichina.com



雷达高分辨距离像闪烁现象机理分析

张瑞*,魏玺章,黎湘,刘振

国防科学技术大学空间电子信息技术研究所, 长沙 410073

* E-mail: zhangrui0406@yahoo. com. cn

收稿日期: 2010-09-14; 接受日期: 2010-11-09

摘要 高分辨距离像(HRRP)的姿态敏感性是影响雷达自动目标识别性能的主要因素. 传统理论分析认为: 在不发生散射点越距离单元走动(MTRC)的姿态内, HRRP具有一定的稳定性, 相似度很高. 然而, 对暗室实测数据的观察表明: 即使没有发生散射点 MTRC, HRRP 的相似度有时并不是很高, 而且会出现异常 HRRP. 本文从基于散射点模型的HRRP形成入手, 分析这些异常 HRRP 的产生原因——闪烁现象. 建立了闪烁现象的数学模型并以此为基础分析了闪烁时 HRRP的"伪双峰"特点. 同时, 推导了闪烁现象的发生条件及发生概率随雷达载频的变化规律, 最后用暗室实测数据验证了文中关于闪烁现象的理论分析的正确性.

关键词 雷达自动目标识别 高分辨距离像 姿态敏感性 闪烁

高分辨距离像(HRRP)反映了目标散射点在雷达 视线上的分布情况, 且相对 ISAR 二维成像获取容易, 因此基于 HRRP 的目标识别技术一直受到普遍的关 注[1-4]. HRRP 识别的难点在于其强的姿态敏感性[5-7]. 一般情况下, 10°姿态变化内, 目标散射点等效模型 可近似认为不变; 在此范围内, 若散射点没有在各距 离分辨单元间徙动(MTRC), HRRP 中尖峰的位置相 对稳定; 而尖峰的幅度是各距离分辨单元内散射点 强度的矢量合成,即使没有发生散射点 MTRC, 也是 随姿态快变的. 因此, HRRP 具有峰值位置缓变性和 峰值幅度快变性[8]. 基于 HRRP 的这一特性, 现有的 各种 HRRP 识别常依据不发生 MTRC 将目标划分为 很多角域、假定各角域内的 HRRP 基本稳定[5,9,10]. 然 而在暗室实测数据中发现:即使没有发生散射点 MTRC, 有时 HRRP 之间的相似度并不是很高[11], 也 存在一些 HRRP(闪烁样本[12], 奇异样本[13]), 统计特 性与相邻 HRRP 差异很大[12]; ISAR 成像中, 也多次 在实测数据中发现突然有一次或者两三次回波发生异常,实包络波形明显变化,但随后回波包络又恢复正常,导致 ISAR 包络对齐时的突跳误差,影响 ISAR 像的质量^[14]. 文献[12]通过平滑处理抑制"闪烁 HRRP",提高 HRRP的正确识别率;文献[13]指出可通过评价函数衡量每一个 HRRP成为奇异样本的概率,然后设定门限去除概率较大的样本. 但是对于这些 HRRP产生的原因,暂时还没有文献进行深入分析.

与以往分析不同,本文从基于散射点模型的HRRP形成入手,分析了HRRP在刻画目标散射点分布时的特点.在此基础上,重点研究距离分辨单元内散射点的相干抵消(文中称为闪烁现象)造成的异常HRRP.建立了闪烁现象的数学模型并基于此模型分析了闪烁时HRRP中尖峰个数、位置及幅度的特点.深入分析了闪烁现象的发生条件,并以此为基础推导了闪烁现象发生概率随雷达载频的变化规律,最后用暗室实测数据验证了文中关于闪烁现象的理论

英文版发表信息: Zhang R, Wei X Z, Li X, et al. Analysis about the speckle of radar high resolution range profile. Sci China Tech Sci, 2011, 54: 226–236, doi: 10.1007/s11431-010-4207-x

分析的正确性.

1 基于散射点模型的 HRRP 特性分析

对宽带雷达目标回波进行匹配滤波,得该目标的 HRRP (文中均指的是幅度 HRRP)为^[8]

$$S(t) = \left| \sum_{i=1}^{L} \sigma_i e^{-j\frac{4\pi f_c}{c}R_i} psf\left(t - \frac{2R_i}{c}\right) \right|, \tag{1}$$

其中 σ_i 和 R_i 分别为目标第i个散射点的散射强度和位置,L表示目标上散射点个数, f_c 为载波频率,c为光速, $psf(t)=F^{-1}[|P(f)|^2]$ 为点散布函数,与雷达信号的频谱有关。当雷达信号带宽为B,即 $f\in[f_c-B/2,f_c+B/2]$ 上|P(f)|=1时, $psf(t)=\mathrm{sinc}(Bt)=\frac{\sin(\pi Bt)}{\pi Bt}$,决定了雷达的名义分辨率 $\Delta R=c/2B$.

令 t = 2x/c,将(1)式转换到距离域为:

$$S(x) = \left| \sum_{i=1}^{L} \sigma_i e^{-j\frac{4\pi f_c}{c}R_i} psf\left(\frac{2}{c}(x - R_i)\right) \right|. \tag{2}$$

从(2)式可见, HRRP 本质上就是各散射点位置处 $sinc(\cdot)$ 的 矢 量 合 成 . 由 于 $sinc(\cdot)$ 的 主 瓣 宽 度 为 $c/B=2\Delta R$, 从(2)式中可得到以下结论.

1) 当 $|R_i - R_j|$ ≥ 2 ΔR 时,若忽略 sinc(·) 旁瓣的影响,(2)式可近似为

$$S(x) = \left| \sum_{i=1}^{L} \sigma_i psf\left(\frac{2}{c}(x - R_i)\right) \right|. \tag{3}$$

此时各散射点处的 sinc(·)相互不影响, HRRP 上 尖峰的位置和幅度能够很好表征各散射点的位置和 散射强度. 因此 2ΔR 代表雷达系统的安全分辨能力.

2) 当 $|R_i - R_j| < 2\Delta R$,由于(2)式中相位因子 $\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{4\pi C_c}{c}R_i}$ 和 sinc(·) 主瓣宽度的影响,HRRP 在表征散射点位置 和散射强度信息时将产生误差.以仅包含 2 个散射点 σ_i , σ_j 的目标为例,图 1 和 2 分别给出了 B=100 MHz, f_c =1 GHz, $\sigma_i \approx \sigma_j$ =1, $\Delta R \leqslant |R_i - R_j| < 2\Delta R$ 和 $R_i - R_j| < |\Delta R|$ 时该目标的 HRRP.

从图1和2可见以下两点.

① $\Delta R \leq |R_i - R_j| < 2\Delta R$ 时,HRRP 不一定出现两个尖峰. 当 $|R_i - R_j| \approx \frac{n\lambda}{2}$, $n = \lceil f_c/B \rceil, \dots, \lceil 2f_c/B - 1 \rceil$ ($\lambda = 1$

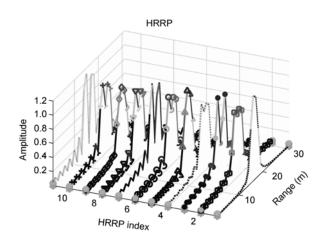


图 1 |R_i-R_i| ∈ [1.5 m, 1.875 m]的 HRRP 序列

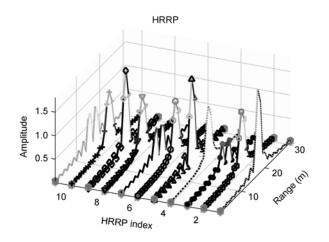


图 2 |R_i-R_j| ∈ [0.6 m, 0.975 m]的 HRRP 序列

c/f_c表示雷达波长)时,两散射点回波相位相同,回波相干叠加,HRRP 中仅存在一个尖峰. 两个可分辨的点目标在 HRRP 上体现为一个尖峰.

② $|R_i - R_j| < \Delta R$ 时, HRRP 不一定呈现一个尖峰. 当 $|R_i - R_j| \approx \frac{(2n+1)\lambda}{4}$, $n=0,1,\cdots,\lceil f_c/B-1.5\rceil$ 时,两散射点回波相干抵消,合成 HRRP 中出现两个处于不同距离分辨单元的尖峰^[15,16]. 两个不可分辨的点目标(位于同一距离分辨单元)在 HRRP 上体现为两个处于不同距离分辨单元的尖峰,我们称这种现象为闪烁现象.

上述两种情况下, HRRP 的尖峰数目、位置及幅度不能代表目标上散射点的数目、真实位置及强度信息, 是一种奇异的 HRRP 样本. 造成这种现象的原因在于雷达带宽有限, 导致散射点在 HRRP 上并不是体现为一个冲激响应, 而是具有一定宽度扩展的 sinc(·)

函数. 因此,会出现上述两种与距离分辨率定义不符的异常现象. 特别的,闪烁现象表明距离分辨单元内散射点相对位置的改变不仅影响 HRRP 中尖峰的幅度,也会引起尖峰数目及位置的变化,质疑了传统关于HRRP姿态敏感性的认识. 因此下面重点对闪烁现象进行研究.

2 闪烁现象机理分析

2.1 闪烁现象的数学模型与分析

由上一节的分析知:处于同一距离分辨单元的两个散射点,满足下面条件(即散射强度相近、相位近似相消)时,子回波相干抵消,HRRP 出现异常,称为闪烁现象.

$$\sigma_i \approx \sigma_j = \sigma, \ |R_i - R_j| \approx (2n+1)\lambda/4,$$

 $n = 0, 1, \dots, \lceil f_c/B - 1.5 \rceil,$
(4)

将(4)式代入(2)式,可得闪烁发生时, HRRP 的数学模型

$$S(x) = \left| \sigma \operatorname{psf}(2(x - R_i)/c) - \sigma \operatorname{psf}(2(x - R_j)/c) \right|. \tag{5}$$

基于此数学模型,可推知闪烁时 HRRP 具有以下 3 个特点.

1) 伪双峰现象

由雷达距离分辨的概念知,位于同一距离分辨单元的两个散射点,在 HRRP 上是不可分辨的,体现为一个合成的尖峰. 但是发生闪烁时,这样的散射点在 HRRP 上却表现为处于两个距离分辨单元的两个尖峰(见图 3),我们称其为"伪双峰"现象.

2) 峰值位置异常

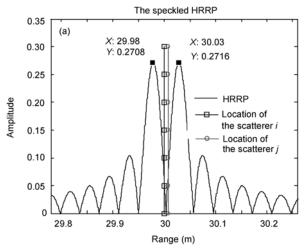
为了得到闪烁时 HRRP 中尖峰位置的解析表达式,利用闪烁 HRRP 的数学模型(5)式. 由于(5)式中 $psf\left(\frac{2}{c}x\right) = sinc\left(\frac{2B}{c}x\right)$ 包含三角函数,不利于数学求解,为了分析的方便,可忽略其旁瓣的影响,对主瓣

基于最小二乘准则进行多项式逼近,结果如下(图 4):

$$sinc(x) \approx -x^2 + 1, |x| \le 1.$$
 (6)

上述近似的误差 J 定义如下:

$$J = \frac{\left(\int_{-1}^{1} (\operatorname{sinc}(x) - (-x^2 + 1))^2 dx\right)^{1/2}}{\left(\int_{-1}^{1} (\operatorname{sinc}(x))^2 dx\right)^{1/2}} = 13.64\%.$$
 (7)



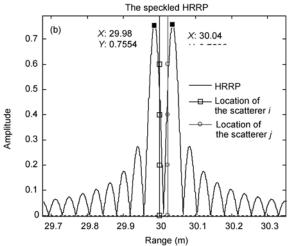


图 3 B=4 GHz, $f_c=10$ GHz 时的 HRRP

(a)
$$R_i = 30 \text{ m}$$
, $R_j = R_i + \frac{\lambda}{4}$; (b) $R_i = 30 \text{ m}$, $R_j = R_i + \frac{3\lambda}{4}$

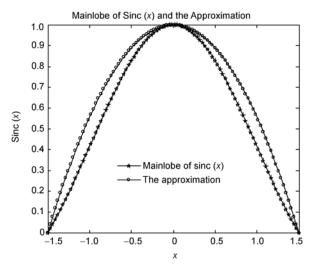


图 4 sinc(x)主辦及其二次多项式逼近示意图

故

$$psf\left(\frac{2}{c}x\right) = \operatorname{sinc}\left(\frac{2B}{c}x\right)$$

$$= -(2B/c)^{2}x^{2} + 1, \quad |x| \leq c/(2B), \qquad (8)$$
代入(5)式, 得 (假设 $R_{j} \geq R_{i}, \quad \Delta d = \left|R_{i} - R_{j}\right|)$

$$S(x) = \sigma \mid \left(\operatorname{sinc}((2B/c)(x - R_{i})) - \operatorname{sinc}((2B/c)(x - R_{j}))\right) \mid$$

$$0, \qquad x < (R_{i} - c/(2B)), \qquad x < (R_{i} - c/(2B)), \qquad x < (2B/c)(x - R_{i}))^{2} + \sigma, \qquad (R_{i} - c/(2B)) \leq x < (2B/c)(x - R_{i})^{2} + \sigma, \qquad (2B/c)(x - R_{i})^{2} + \sigma, \qquad$$

由(9)式可知: 发生闪烁时, HRRP 中两个尖峰的位置为:

$$x_1 \approx R_j - c/(2B), \quad x_2 \approx R_i + c/(2B).$$
 (10)

对应峰值为(后面将对此峰值详细分析):

$$S(x_1) = S(x_2) = 2\sigma(2B/c)^2 \Delta d(c/(2B) - \Delta d/2).$$
 (11) 两峰之间谷的位置为:

$$x_g = (R_i + R_j)/2. (12)$$

对应谷值为:

$$S(x_{\sigma}) = 0. (13)$$

由(10)式可得: 两峰间距

$$p_{12} = 2*(c/(2B)) - \Delta d$$
. (14)

因为 $\Delta d < c/(2B)$, 所以

$$2(c/(2B)) > p_{12} > c/(2B) > \Delta d$$
,

也就是说此时的两个尖峰是处在两个距离分辨单元上,其间距大于散射点的真实距离,如图 5.

3) 峰值幅度异常

由(11)式可见, 闪烁时 HRRP 中尖峰的幅度与散射点间的真实距离 Δd 有关, 散射点相距越远, 尖峰幅值越高. 依据(11)式, 可知

$$S(x_1) = S(x_2) = 2\sigma (2B/c)^2 \Delta d \left(c/(2B) - \frac{\Delta d}{2} \right)$$

= $-\sigma (2B/c)^2 (\Delta d - c/(2B))^2 + \sigma$
= $-(\sigma/\Delta R^2)(\Delta d - \Delta R)^2 + \sigma$, (15)

其中 $\Delta d = (2n+1)\lambda/4$, $n=0,1,\dots,\lceil f_c/B-1.5\rceil$.

图 6 给出了闪烁 HRRP 中尖峰幅度随 Δd 的变化曲线. 由(15)式和图 6 可见, 尖峰的幅度随 Δd 的增大而增大, 且 $S(x_i) \in (0,\sigma)$.

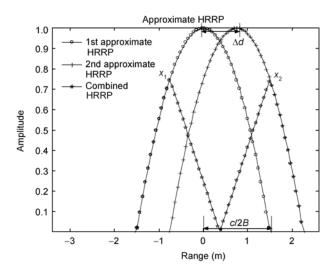


图 5 双峰位置示意图

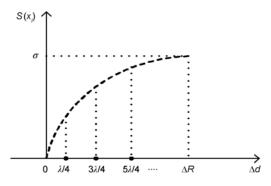


图 6 闪烁 HRRP 中尖峰幅度随Δd 的变化曲线

再者,考虑到点散布函数 psf(·) 旁瓣的影响,下面也分析发生闪烁时,散射点间距满足什么样的条件,HRRP 的尖峰幅度高于 sinc(·)第一旁瓣,在 HRRP 中表现为两个比较强的尖峰.

由(11)式知,闪烁时 HRRP 中尖峰的幅度为 $S(x_1)=S(x_2)=2\sigma(2B/c)^2\Delta d(c/(2B)-\Delta d/2)$,而 $sinc(\cdot)$ 第一旁瓣的最大值为 A=|sinc(1.5)|.令 $S(x_i)>\sigma|sinc(1.5)|$,i=1,2,即

$$\Delta d(\Delta R - \Delta d/2) > (\Delta R^2/2) \cdot |\operatorname{sinc}(1.5)|. \tag{16}$$
 计算出

 $0.1124 \ \Delta R < \Delta d < 1.8876 \ \Delta R \ ,$ (17)

又 $\Delta d < \Delta R$,所以

$$0.1124 \ \Delta R < \Delta d < \Delta R \ . \tag{18}$$

因此,当两散射点间的距离满足(4)和(18)式时,发生闪烁现象且闪烁时 HRRP 中的尖峰的幅度大于 sinc(·)第一旁瓣,表现为两个比较强的尖峰.

2.2 闪烁现象发生条件的深入理解

第2节定性分析了闪烁现象的发生条件——两散射点之间的相位近似相干抵消,为了后续研究的需要,下面将定量分析散射点之间的相对位置满足怎样的条件时,会发生闪烁现象.

由第 2 节分析知,当两散射点之间的相位近似相干抵消,也就是 $\Delta d = \left| R_i - R_j \right| \approx (2n+1)\lambda/4, n=0,1,\cdots,$ $\left\lceil f_c/B-1.5 \right\rceil$ 时,会发生闪烁现象。因此,对于同一距离分辨单元上的两个散射点,在若干个区间段上,均会发生闪烁现象,如图 7 所示。为此定义闪烁区间 Δd_s 表示发生闪烁现象时两散射点间的距离差,定义如下:

$$\Delta d_{s} = \bigcup_{n=0}^{\lceil f_{c}/B - 1.5 \rceil} \Delta d_{sn}$$

$$= \bigcup_{n=0}^{\lceil f_{c}/B - 1.5 \rceil} [(2n+1)\lambda/4 - W_{nf_{c}}, (2n+1)\lambda/4 + W_{nf_{c}}], (19)$$

其中 $\Delta d_{sn} = [(2n+1)\lambda/4 - W_{nf_c}, (2n+1)\lambda/4 + W_{nf_c}]$, 表示第 n 个闪烁子区间, W_{nf_c} 表示第 n 个闪烁子区间的大小,与 n, f_c 有关.

 W_{nf_c} 的确定准则. W_{nf_c} 表示第n 个闪烁子区间的大小,即当

$$((2n+1)\lambda/4-W_{nf_c}) \le |R_i-R_j| \le ((2n+1)\lambda/4+W_{nf_c})$$
时,发生闪烁现象,HRRP 具有"双伪峰"特征.

图 8 给出了 B=4 GHz, $f_c=10$ GHz, $R_i=30$ m, $\lambda/4-0.16\lambda/4 \leqslant |R_i-R_j| \leqslant \lambda/4+0.16\lambda/4$ 时的 HRRP. 由图 8 可见: 当 $|R_i-R_j| = (2n+1)\lambda/4$ 时,HRRP 中双峰之间的谷值为 0;随着 $|R_i-R_j|$ 远离 $(2n+1)\lambda/4$,双峰之间的谷值逐渐增大,双峰越来越不明显;当双峰之间的谷值高于双峰值的-3 dB 时,认为此时 HRRP不再具有"伪双峰",闪烁现象消失. 因此, W_{nf_c} 等于闪烁现象刚好消失时散射点间距偏离 $(2n+1)\lambda/4$ 的大小.图 9 给出了 B=4 GHz, $f_c=8\sim17$ GHz 时的 W_{nf_c} . 由图 9 可见:随着 n 的增加 W_{nf_c} 近似线性增加,增加速度与 f_c 有关,记为 $K(f_c)$. 这点可以用点散布函数 sinc(·)来解释:对于相位完全抵消的两个散射点,发生闪烁现象,HRRP 出现"双伪峰",此时两散射点的点散布函数相距 $(2n+1)\lambda/4$. n 越大,两散射点的点散布函数

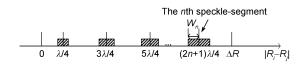
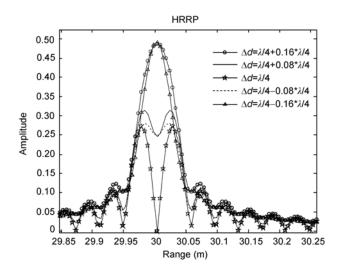


图 7 发生闪烁时散射点间距Δd 示意图



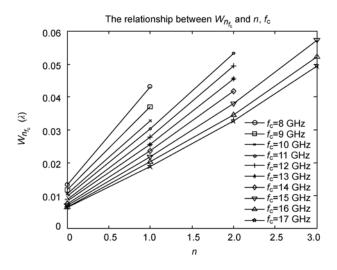


图 9 B=4 GHz, $f_c=8\sim17$ GHz 时闪烁子区间 W_{nf_c}

相距越远,因此即使 Δd 在 $(2n+1)\lambda/4$ 附近有微小的变化,所合成的 HRRP 仍会是"双伪峰",所以 W_{nf_c} 大. 又因为在主瓣的小区域内,sinc(·) 近似为线性变化的,所以 W_{nf_c} 随着 n 增加近似线性增加. 可令 W_{nf_c} = W_{0f_c} + $K(f_c)\cdot n$,代入(19)式,得

$$\Delta d_{s} = \bigcup_{n=0}^{\lceil f_{c}/B-1.5 \rceil} \Delta d_{sn}$$

$$= \bigcup_{n=0}^{\lceil f_{c}/B-1.5 \rceil} \left[\frac{(2n+1)\lambda}{4} - W_{nf_{c}}, \frac{(2n+1)\lambda}{4} + W_{nf_{c}} \right]$$

$$= \bigcup_{n=0}^{\lceil f_{c}/B-1.5 \rceil} \left[\frac{(2n+1)\lambda}{4} - (W_{0f_{c}} + K(f_{c}) \cdot n), \frac{(2n+1)\lambda}{4} + (W_{0f_{c}} + K(f_{c}) \cdot n) \right]. \tag{20}$$

2.3 闪烁现象的发生概率

闪烁现象是由于距离分辨单元内散射点的相干叠加产生的,而一般目标的HRRP总是包含若干个距离分辨单元的,因此下面将首先分析单个距离分辨单元发生闪烁的概率,在此基础上,研究HRRP发生闪烁的概率.

2.3.1 单个距离分辨单元发生闪烁的概率

对于同一距离分辨单元内的两个散射点 σ_i , σ_j ,由于其在距离分辨单元上的分布没有特别的规律,假设其在距离分辨单元内均匀分布,即 $\Delta d = |R_i - R_j|$ ~U(0, c/2B),所以

$$P_{sn} = p\{\Delta d \in \Delta d_{sn}\} = 4BW_{nf}/c, \qquad (21)$$

代入(20)式,可得该距离分辨单元发生闪烁的概率为

$$\begin{split} p_{\text{cell}} &= p\{\Delta d \in \Delta d_{s}\} = p\{\Delta d \in \bigcup_{n=0}^{\lceil f_{c}/B - 1.5 \rceil} \Delta d_{sn}\} \\ &= \sum_{\forall i, j \in [0, \lceil f_{c}/B - 1.5 \rceil]} \sum_{n=0}^{p\{\Delta d \in \Delta d_{sn}\}} p\{\Delta d \in \Delta d_{sn}\} \\ &= \frac{4B}{c} \sum_{n=0}^{\lceil f_{c}/B - 1.5 \rceil} W_{nf_{c}} = \frac{4B}{c} \sum_{n=0}^{\lceil f_{c}/B - 1.5 \rceil} (W_{0f_{c}} + K(f_{c}) \cdot n) \\ &\approx \frac{M = \lceil f_{c}/B - 1.5 \rceil}{c} \frac{4B}{c} * (1 + M) * \left(W_{0f_{c}} + K(f_{c}) \cdot \frac{M}{2}\right). \end{split}$$
(22)

根据(22)式,可得到不同 f_c 下单个距离分辨单元发生闪烁的概率,见图 10. 由图 10 可见: 闪烁概率随 f_c 的变化不是单调的. 这是因为 f_c 越高,雷达波长越短,对于同一距离分辨单元上的两散射点,其发生闪烁的子区间越多((4)式中 n 的范围越大). 但是由于各闪烁子区间的宽度 W_{η_c} 随着载频的增大有轻微的减小(由图 9 可见),因此闪烁概率随 f_c 的变化不是单调的.

2.3.2 HRRP 发生闪烁的概率

假设某目标包含 M 个距离分辨单元(各距离分辨单元均包含两个以上散射点),那么其 HRRP 是由这 M 个距离分辨单元回波构成的高维矢量. 假设各距离分辨单元之间是统计独立的,该HRRP发生闪烁的概率为:

$$p_{HRRP} = 1 - (1 - p_{cell})^{M}. (23)$$

图 11 给出了 B=4 GHz, f_c =10 GHz 时, HRRP 发生 闪烁概率随距离分辨单元个数 M 的变化规律.

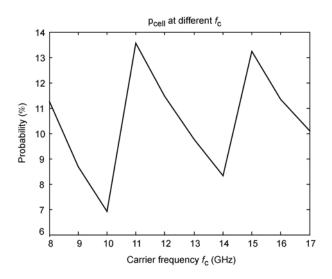


图 10 B=4 GHz, f_c=10 GHz 时单个距离分辨单元 发生闪烁的概率

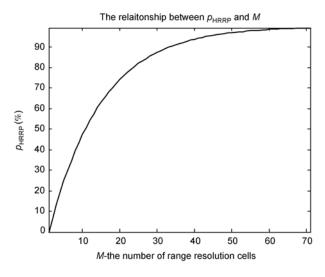


图 11 HRRP 发生闪烁概率随距离分辨单元数 M 的变化

3 实验验证与结果分析

3.1 数据说明

本文采用某目标暗室测量数据,该暗室测量目标的外型、尺寸如图 12 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,雷达的距离分辨率 ΔR =0.0375 m,雷达波长 λ =0.03 m.目标俯仰角为 0°,方位角 0°~90°变化(鼻翼方向为 0°),方位角变化间隔为 0.2°.将测得的宽带数据做 IFFT,得到暗室目标在不同姿态下的HRRP.对 0°~10°方位下的 50 个 HRRP 作方位向 FFT,得到该姿态范围内暗室目标的 ISAR 像,如图 13.

依据暗室目标 ISAR 像和其物理结构,文献[17]建立暗室目标的散射点位置模型如图 14. 由图 14 可见: 0°方位时,6 和 7 号散射点视线距离差为 0,处于同一距离分辨单元内,此时对应距离分辨单元的回波强度应该最大,但是实测数据中却不是这样的.图 15 为 0°~0.8°方位的实测 HRRP,由图 15 可见,0°时 6 和 7 号散射点所在距离分辨单元的回波强度并不是最大值,而是在 0.6°时达到最大值.对 4 和 5 号散射点所在距离分辨单元进行分析,也有同样的结论,见图 15.

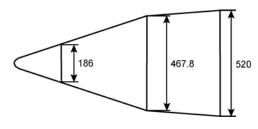


图 12 暗室测量目标外形和尺寸(mm)

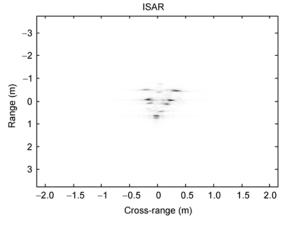


图 13 暗室目标的 ISAR 像

造成这种误差的原因可能有两个: 1) 图 15 的散射点模型存在误差,与实测 HRRP 符合的散射点模型为图 16; 2) 暗室观测时,目标在转台上放置不平稳导致雷达波 0°入射时波前平面并非完全与目标垂直,而是存在 0.6°的夹角,如图 17 所示.考虑到暗室目标结构的对称性,其散射点模型也应该是对称的,因此这种误差是由于暗室观测时目标放置不平稳导致的.因此在分析暗室实测的目标 HRRP 时,要考虑这 0.6°

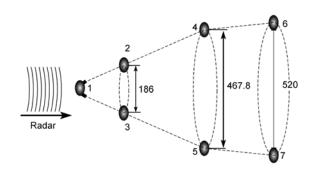


图 14 暗室目标的散射点位置模型-

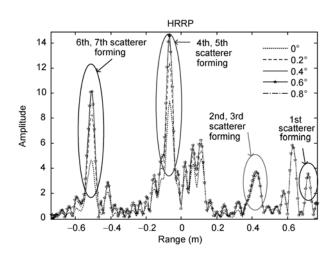


图 15 0°~0.8°方位暗室目标的实测 HRRP

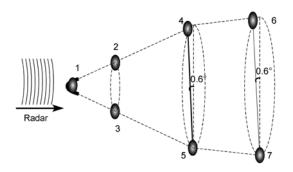


图 16 暗室目标的散射点位置模型二

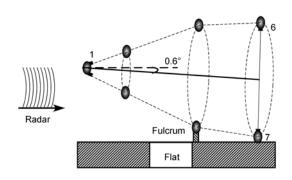


图 17 暗室转台测量场景示意图

的误差,也就是说,实测的方位 0.6°的 HRRP,对于目标而言,是电磁波从鼻翼方向入射的 0°姿态的 HRRP.

3.2 暗室目标闪烁现象的理论分析

由暗室目标的散射点模型图 14 计算知:方位 0°-10°(对应实测数据 0.6°~10.6°), 1 号散射点所在距离分辨单元只有一个散射点; 0°~4.2°(对应实测数据 0.6°~4.8°)下,6和7号散射点处于同一距离分辨单元且散射强度相近(由于目标结构的对称性); 0°~4.6°(对应实测数据 0.6°~5.2°)下,4和5号散射点处于同一距离分辨单元且散射强度相近.依闪烁现象的定义(4)知,在实测数据 0.6°~4.7°内,6和7号散射点所在距离分辨单元可能发生闪烁现象; 0.6°~5.2°范围内,4和5号散射点所在距离分辨单元可能发生闪烁现象; (从暗室目标的 ISAR 像和 HRRP来看,2号点并不是很明显,因此本文不分析2和3号散射点的闪烁现象).

具体地说,暗室测量时,雷达距离分辨率 ΔR = 0.0375 m,雷达波长 λ =0.03 m, $\Delta R \approx \lambda$. 根据 3.2 节分析知: 分别在 $\Delta d = \lambda/4$ 和 $\Delta d = 3\lambda/4$ 附近存在两个闪烁子区间 Δd_{s0} , Δd_{s1} , 且 $\Delta d_{s1} > \Delta d_{s0}$. 结合图 14 中的目标参数,可计算出方位 0.8°, 2.5°(对应实测数据 1.4°, 3°)附近, 6 和 7 号散射点所在距离分辨单元发生闪烁;方位 1°, 2.8°(对应实测数据 1.6°, 3.4°)附近, 4 和 5 号散射点所在距离分辨单元发生闪烁. 后面将对这一理论分析结果进行验证.

再者,从 3.3 节中可知: 暗室测量条件下, W_{0f_c} = 0.0105 λ , W_{1f_c} = 0.0327 λ , 单个距离分辨单元闪烁的 概率为 p_{cell} =0.07; 又由于在方位 0°~4.2°内(对应实测数据 0.6°~4.8°),有两个距离分辨单元包含两个以上散射点(6 和 7 号散射点所在距离分辨单元及 4 和 5 号散射点所在距离分辨单元),因此在这个方位内,

 p_{HRRP} =1-(1-0.07)²=13.5%,也就是说,应该有 22*13.5≈3个闪烁 HRRP.而方位 4.4°~4.6°内(对应实测数据 5°~5.2°),有一个距离分辨单元包含两个以上散射点(4,5号散射点所在距离分辨单元),因此在这个方位内, p_{HRRP} =1-(1- p_{cell})^M=1-(1-0.07)¹=7%,也就是说,应该有 4*7%≈0个闪烁 HRRP.后面也将对这一理论分析结果进行验证.

3.3 实验验证与结果分析

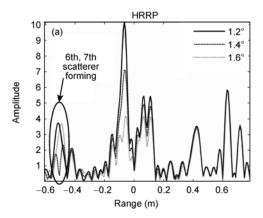
图 18(a)和(b)为方位 $1.2^{\circ}\sim1.6^{\circ}$, $2.6^{\circ}\sim3.4^{\circ}$ 下的暗室目标实测 HRRP,从图 18 可见:方位 1.4° , 3.2° 时,6和7号散射点形成的 HRRP中的尖峰个数突变为2个,两个尖峰的间距 $\Delta d>\Delta R$,位于两个距离分辨单元,且两峰之间的谷值小于峰值的-3dB,具体数据标注于图 19(a)和(b).因此,方位 1.4° , 3.2° 时,6和7号散射点所在距离分辨单元发生闪烁,与 4.2节中理论分析结果一致.

图 20(a)和(b)为方位 $1.4^{\circ} \sim 2^{\circ}$, $3.4^{\circ} \sim 4.2^{\circ}$ 下的暗室目标实测 HRRP,从图 20 可见:方位 1.8° , 4° 时,4 和 5 号散射点形成的 HRRP 中的尖峰个数突变为 2 个,两个尖峰的间距 $\Delta d > \Delta R$,位于两个距离分辨单元上,且两峰之间的谷值小于峰值的—3 dB,具体数据标注于图 21(a)和(b).因此,方位 1.8° , 4° 时,4 和 5 号散射点所在距离分辨单元发生闪烁,与 4.2 节中理论分析结果一致.

再者,由图 18 可见,方位 2.8°~3.4°内,6 和 7 号散射点所形成的 HRRP 都具有双峰的特点,而 1.4°附近只有一次 HRRP 具有双峰的特点;由图 20 可见,4 和 5 号散射点所形成的 HRRP 也有同样的现象,这表明了闪烁子区间 Δd_{s1} 比 Δd_{s0} 宽.与 4.2 节中理论分析结果吻合.

同时,在图 18 和 19 中可见:实测数据 0.6°~4.8°方位内,有 4幅闪烁 HRRP; 5°~5.2°方位内,有 0幅闪烁 HRRP,与理论分析结果稍有出入.当然,由于受实验条件的限制,实测数据是以 0.2°为方位间隔的,数据样本比较少,因此并不能很好的验证闪烁现象的发生概率.

为了进一步明确闪烁造成的 HRRP 异常,本文也分析了各方位下的 HRRP 的相似性. 图 22(a), (b), (c)分别为 1 号散射点,6和 7 号散射点,4和 5 号散射点形成 HRRP 的相邻相似度曲线(即目标 HRRP 的局部相似度). 由图 22(a)可见: 当各距离分辨单元内仅包含一个散射点时,相邻 HRRP 的相似性很高,接近 100%. 这是



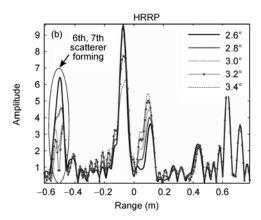
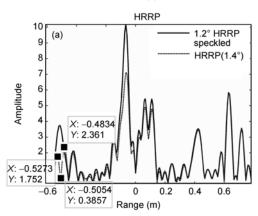


图 18 暗室目标实测 HRRP

(a) 1.2°~1.6°的实测 HRRP; (b) 2.6°~3.4°的实测 HRRP



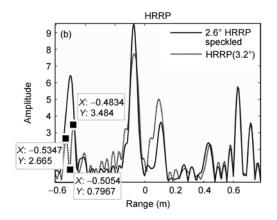
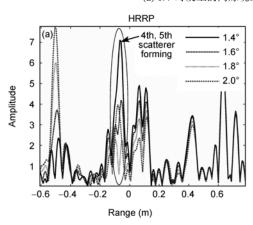


图 19 实测数据中的闪烁现象

(a) 1.4°时发生的闪烁现象; (b) 3.2°时发生的闪烁现象



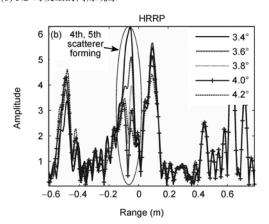


图 20 暗室目标实测 HRRP

(a) 1.4°~2°的实测 HRRP; (b) 3.4°~4.2°的实测 HRRP

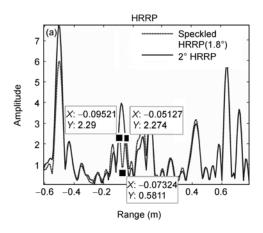
因为当各距离分辨单元内仅包含一个散射点时,距离单元的回波强度是不随姿态改变的,因此只要没有发生散射点 MTRC, HRRP 的波形是稳定不变的.由图 22(b)和(c)可见: 当距离分辨单元内存在 2 个以

上散射点时,相邻 HRRP 的相似性波动比较大,这是因为散射点间的矢量合成导致回波强度随姿态快变.特别的,当发生闪烁现象时,相邻 HRRP 的相似性下降到局部最低值(其中的具体数据已在图中进行了标

注). 这是因为闪烁时,不只是 HRRP 中尖峰的幅度 发生了变化,尖峰的个数、位置等都发生了突变,所 以闪烁时的 HRRP 与相邻 HRRP 相似度很低.

注意到图 22(b)中,方位 3°,3.2°时,6 和 7 散射点形成 HRRP 的相邻相似度比 1.4°时高,这是因为:由

3.1节分析知,闪烁时 HRRP"双伪峰"的幅度依赖于散射点的间距,间距越大,"双伪峰"越高.而方位 3°,3.2°发生闪烁时,散射点的间距($\Delta d=3\lambda/4$)大于 1.4°发生闪烁时($\Delta d=\lambda/4$),因此 3°,3.2°闪烁 HRRP 中"双伪峰"的幅度相对要大些.而由 HRRP 相似性的定义知:



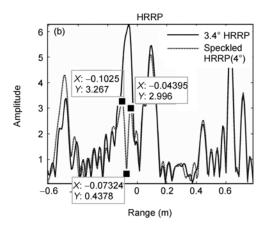


图 21 实测数据中的闪烁现象

(a) 1.8°时发生的闪烁现象; (b) 4°时发生的闪烁现象

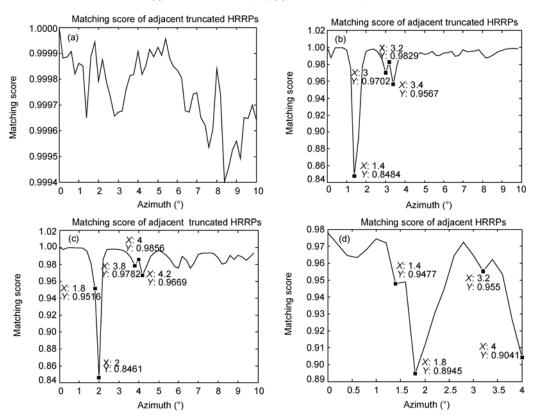


图 22 相邻 HRRP 的相似度

(a) 1 散射点形成 HRRP 的相邻相似度; (b) 6 和 7 散射点形成 HRRP 的相邻相似度; (c) 4 和 5 号散射点形成 HRRP 的相邻相似度; (d) 0°~4°方位下各 HRRP 与平均 HRRP 的相似度

HRRP中各距离单元回波强度对相似性测度的贡献是与其幅度大小成正比的^[18],所以3°,3.2°时,6和7散射点形成HRRP的相邻相似度比1.4°时要高.图22(c)中也是同样的道理.

考虑到HRRP识别中常以各角域内的平均HRRP作为模板,本文也分析了0°~4°方位下,各HRRP与平均HRRP的相似度,见图22(d).之所以选择0°~4°方位是因为:在此方位内,各散射点均没有发生MTRC,依据传统的角域划分规则,0°~4°方位下的HRRP是处于同一角域的.从图22(d)可见:发生闪烁现象(方位1.4°,3.2°,1.8°,4°)时,HRRP与平均HRRP的相似度下降到局部最低值;并且在4和5号散射点发生闪烁的姿态(1.8°,4°)下,HRRP与平均HRRP的相似度要更低,这是因为4和5号散射点的散射强度要大于6和7号散射点的散射强度(从图15中可见),因此其对整体HRRP相似度的影响更大.

4 结论

距离分辨单元内散射点之间的干涉导致 HRRP 严重的姿态敏感. 本文通过分析表明其不仅造成 HRRP 中尖峰幅度快变, 也会导致 HRRP 中尖峰个 数、位置的突变、造成HRRP的异常. 这些异常HRRP 对目标建模的精度、模型的推广性能及 ISAR 成像的 影响已经引起了关注, 但是对其产生原因, 暂时没有 文献进行深入分析. 本文从HRRP的数学模型出发分 析了奇异HRRP的产生原因, 重点研究了闪烁现象导 致的 HRRP 异常. 通过对闪烁时 HRRP 中尖峰位置和 幅度的理论分析表明, 闪烁 HRRP 具有"伪双峰"特点. 同时, 深入分析了闪烁现象的发生条件, 并以此为基 础推导了统计意义下闪烁现象的发生概率随雷达载 频的变化规律, 最后用暗室实测数据验证了文中关 于闪烁现象的理论分析的正确性, 分析了闪烁现象 导致的 HRRP 突变及 HRRP 相似性的下降. 理论分析 和仿真实验表明: 闪烁现象导致依据传统角域划分 准则划分的各角域内的HRRP波形稳定性变差,相似 度下降,对传统 HRRP 识别方法的影响是必然的.同 时, 闪烁会造成目标位置偏差 1~2 个距离分辨单元, 而 ISAR 成像时平动补偿的允许误差是 1/8 个距离分 辨单元, 因此闪烁也必然会造成 ISAR 像距离向的模 糊. 下一步将就闪烁对 HRRP 模板库建立、特征提取、 匹配识别及 ISAR 成像的影响展开研究.

参考文献_

- 1 Hudson S, Psaltis D. Correlation filters for aircraft identification from radar range profiles. IEEE T Aero Elec Sys, 1993, 29(3): 741–748
- 2 Zyweck A, Bogner R E. Radar target classification of commercial aircraft. IEEE T Aero Elec Sys, 1996, 32(2): 598-606
- 3 Jacobs S P. Automatic Target Recognition Using High-resolution Radar Range Profiles. Dissertation of Doctoral Degree. Washington: Washington University, 1999. 35–83
- 4 杜兰, 刘宏伟, 保铮, 等. 基于复数高分辨距离像特征提取的雷达自动目标识别. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2009, 39(7): 731-741
- 5 Liao X J, Bao Z, Xing M D. On the aspect sensitivity of high resolution range profiles and its reduction methods. In: Rec IEEE 2000 Int Radar Conf Alexandria, VA, 2000. 310–315
- 6 Xing M D, Bao Z, Pei B N. Properties of high-resolution range profiles. Opt Eng, 2002, 41(2): 493–504
- 7 Vespe M, Baker C J, Griffiths H D. Radar target classification using multiple perspectives. IET Radar Son Nav, 2007, 1(4): 300–307
- 8 保铮, 刑孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2006
- 9 Li H J, Yang S H. Using range profiles as feature vectors to identify aerospace objects. IEEE T Antenn Propag, 1993, 41(3): 261–268
- 10 Du L, Liu H W, Bao Z, et al. A two-distribution compounded statistical model for Radar HRRP target recognition. IEEE T Signal Proces, 2006, 54(6): 2226–2238
- 11 Hyde J W, Alabaster C M. Correlation of target transfer functions and range profiles as a function of aspect angle and resolution. In: IET Waveform Diversity & Digital Radar Conference. London, 2008. 1–5
- 12 陈凤, 侯庆禹, 刘宏伟, 等. 一种新的雷达 HRRP 自适应划分角域建模方法. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(3): 410-417
- 13 Chen B, Liu H W, Chai J, et al. Large margin feature weighting method via linear programming. IEEE T Knowl Data En, 2009, 21(10): 1475–1488
- 14 王根原, 保铮. 逆合成孔径雷达运动补偿中包络对齐的新方法. 电子学报, 1998, 26(6): 5-8
- 15 Wehner D R. High-resolution radar. London: Artech House, 1995
- 16 Mark A R. Fundamental of Radar Signal Processing. New York: McGraw-Hill, 2005
- 17 金光虎. 中段弹道目标 ISAR 成像及物理特性反演技术研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. 26-27
- 18 刘宏伟, 马建华, 保铮. BOX-COX 变换提高雷达高分辨距离像识别性能的物理机理分析. 见:第九届全国雷达学术年会论文集, 烟台, 2004. 354–357