

海面目标雷达回波中多径延迟的概率模型

段崇雯, 胡卫东, 杜小勇

(国防科学技术大学 ATR 重点实验室, 长沙 湖南 410073)

摘要: 为了研究海面多径效应在雷达目标图像中的影响, 将海面建模为满足基尔霍夫近似条件的粗糙面, 从而建立电磁波在目标散射中心与起伏海面之间传播的几何路径。然后, 通过引入海面的波高-斜率联合概率密度函数, 导出雷达回波中多径延迟的概率模型。通过与电磁仿真结果的对比验证了模型的有效性, 并且分析了多径延迟与散射中心高度、雷达俯仰角以及海面特征参数的密切联系。最后, 给出了其海面目标识别研究领域应用的例子。

关键词: 雷达回波; 多径; 概率模型; 海面; 延迟

中图分类号: TP 79

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.06.11

Probability model of multipath delay in radar echoes of sea surface objects

DUAN Chong-wen, HU Wei-dong, DU Xiao-yong

(ATR Key Lab, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To study the effect of multipath propagation on the radar image of sea objects, the work endues the sea surface with the Kirchhoff approximation. Under this assumption, the propagating route of the incident wave is formed geometrically between the object scattering center and the sea surface. The joint probability density function of the sea elevations and slopes is introduced, and the probability model of the multipath delay in radar echoes is accordingly established. The model validation is accomplished through the comparison with electromagnetic simulations. Its relationship with the scattering center height, the radar elevation angle, and the sea characteristic parameters is analyzed. In the end, some examples illustrate the application of the model in the field of sea object recognition.

Keywords: radar echo; multipath; probability model; sea surface; delay

0 引言

在海面目标雷达图像, 包括二维场景的一维距离像, 以及三维场景的合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 或逆 SAR (inverse SAR, ISAR) 图像中, 由海面散射引起的电磁波多径传播会产生形似原目标图像的“伪像”。这些伪像一方面导致原目标图像的畸变, 另一方面也可能为目标特征的提取提供帮助, 因而得到了广泛的研究^[1-9]。由于多径伪像在图像中的位置主要由多径回波相对于直达回波的传播延迟决定, 该延迟量的特性分析和数值估计也因此成为多径现象研究的关键。

考虑到实测数据在获取和利用中的不便, 研究中往往以特定的海面-目标模型来生成包含多径信号的回波数据。现有的模型和仿真方法一般分为两类。一类以散射中心表示目标, 而将海面近似为具有一定反射系数的水平面^[1-2];

另一类则认为海面是具有某种波谱分布的随机粗糙面, 利用电磁计算仿真目标-海面复合模型的雷达回波^[3-6]。前一种情况下, 多径延迟是一个由散射中心高度和雷达俯仰角决定的确定值^[7], 为信号处理和参数估计带来极大便利。然而, 由于水平海面的假设并不总是成立, 这些结果并不能很好地反映客观实际, 其应用也受到限制。后一类方法虽然克服了这一缺陷, 但其计算过程通常复杂而耗时, 并且很难从中分离出多径成分, 不利于后续研究的开展。

本文综合上面两类方法的思路, 通过赋予海面一定的假设条件, 建立了雷达电磁波在目标散射中心与起伏海面之间多径传播的几何路径, 从而将多径延迟的不确定性归因于海面波高和斜率的概率分布, 并最终给出其概率模型。实验通过与电磁仿真结果的对比验证了这一模型的有效性。作为模型在海面目标识别领域的应用, 提出了水平海面假设成立的判别条件, 并在一定前提条件下给出了目标

收稿日期: 2011-12-19; 修回日期: 2012-03-28。

基金项目: 国家自然科学基金(61002021)资助课题

作者简介: 段崇雯(1981-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为雷达图像特征提取与目标识别。E-mail: cynthia_1228@163.com

散射中心高度的最大后验概率估计,最后设计了一种包含多径像的海面目标 SAR 图像的仿真方法。

1 起伏海面模型

实际海面的起伏千差万别,这里仅考虑基尔霍夫近似条件成立的海面。基尔霍夫近似是广泛应用于高频条件下粗糙面后向散射电磁计算的近似方法,它认为当粗糙面的平均曲率半径大于照射电磁波的波长时,其上任一点的散射场可由该点的切平面近似获得^[10]。以粗糙面特征参数来描述,文献[11]给出了如下判定依据:

$$\frac{2\pi}{\lambda}l > 6, l^2 > 2.76\sigma_h\lambda, \text{ 且 } \sigma_k < 0.25 \text{ m}$$

式中, λ 为照射电磁波波长; l 为波面高度起伏的相关长度; σ_h 和 σ_k 分别为波面高度和斜率的均方根(或标准差)。以高斯海面模型为例,由于满足 $l = \sqrt{2}\sigma_h/\sigma_k$ ^[10],可以得到如下更为严格但形式简洁的判定条件:

$$l > \lambda, \text{ 且 } \sigma_k < 0.25 \text{ m}$$

可以看出,对成像雷达的电磁波频率,现实中的很多海面都能满足该假设条件。

在远场假设下,基尔霍夫近似使我们只用几条射线就能表示电磁波的传播路径(具体见第 2 节)。此时,多径延迟的随机性主要源于海面反射面元高度和斜率的概率分布。在地球物理学领域,基于卫星高度计等的应用需求,业已给出与实际测量相当吻合的波高-斜率联合概率密度函数(probability density function, PDF)^[12-13]。其中,文献[12]不仅给出了各向同性海面波高和二维斜率的三维联合 PDF,还通过求边缘分布的办法得到了波高与任一方向斜率的二维联合 PDF:

$$p_{H,K}(h,k) = \frac{1}{2\pi\sigma_h\sigma_k} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{h}{\sigma_h}\right)^2 + \left(\frac{k}{\sigma_k}\right)^2\right]\right\} \cdot \left\{1 + \frac{1}{6}s_1\left[\left(\frac{h}{\sigma_h}\right)^3 - 3\left(\frac{h}{\sigma_h}\right)\right] + \frac{1}{2}s_2\left(\frac{h}{\sigma_h}\right)\left[\left(\frac{k}{\sigma_k}\right)^2 - 1\right]\right\} \quad (1)$$

式中, h 和 k 分别表示海面的波高和斜率; s_1 和 s_2 是两个偏度系数,二者取值为零时,式(1)退化为二维正态分布。

2 多径延迟的表达式

2.1 二维场景下的多径延迟

二维场景模型如图 1 所示。定义海平面为坐标系的 X 轴,过目标散射中心且垂直于海面的方向为 Z 轴,散射中心高度 H_S ,雷达俯仰角 φ_R 。

假设散射中心对入射波的散射是各向同性的。根据基尔霍夫近似,海面的散射作用可以近似为某个局部面元的反射。如果给定面元斜率 k ,令 $\alpha = \arctan k$,则所有位于直线 $z = -\tan(\varphi_R - 2\alpha)x + H_S$ 上的点均有可能存在反射面元,产生 $(\cos \varphi_R, \sin \varphi_R)$ 方向的雷达回波(见图 1 中面元 A、B 和 C)。如果再限定面元高度 h ,则可以根据图中几何关

系求出反射点的坐标: $(\frac{H_S - h}{\tan(\varphi_R - 2\alpha)}, h)$, 以及 $d_1 = \frac{H_S - h}{\sin(\varphi_R - 2\alpha)}$, $d_2 = d_1 \cos(\pi - 2(\varphi_R - \alpha))$,故多径延迟为

$$\Delta r = d_1 + d_2 = 2 \frac{H_S - h}{\sin(\varphi_R - 2\alpha)} \sin^2(\varphi_R - \alpha) \stackrel{\text{def}}{=} \xi(k)(H_S - h) \quad (2)$$

式中

$$\xi(k) = 2 \cdot \frac{\cos^2 \varphi_R k^2 - 2 \sin \varphi_R \cos \varphi_R k + \sin^2 \varphi_R}{-\sin \varphi_R k^2 - 2 \cos \varphi_R k + \sin \varphi_R}$$

此外,还需限制 $K_1 \leq k \leq K_2$, $K_1 = \tan(\frac{\varphi_R}{2} - \frac{\pi}{4})$, $K_2 = \tan \frac{\varphi_R}{2}$, 以使反射点位于散射中心近雷达的一侧,并且高度不超过散射中心。

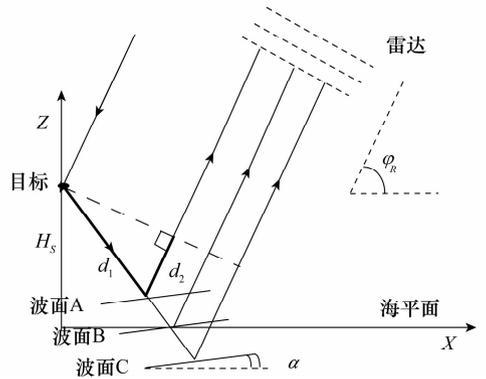


图 1 二维场景模型

2.2 三维场景下的多径延迟

三维场景模型如图 2 所示,海平面为坐标系 XOY 平面,散射中心 S 位于 Z 轴上,坐标 $(0, 0, Z_S)$,入射波方位角 θ_R 和俯仰角 φ_R 如图 2 所示。

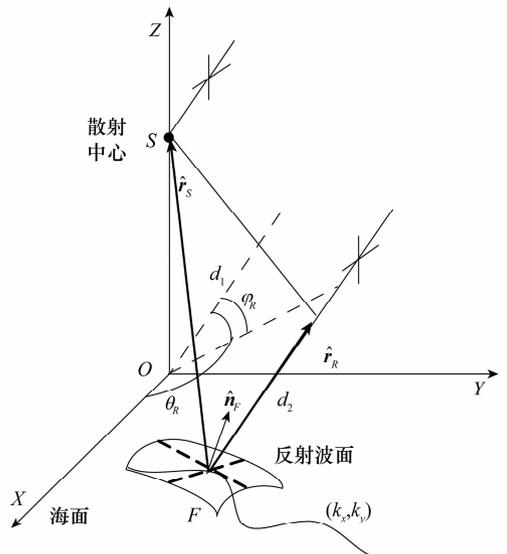


图 2 三维场景模型

给定反射波面斜率 (k_x, k_y) , 其法向量

$$\hat{\boldsymbol{n}}_F = \begin{pmatrix} -\sin \gamma_X \cos \gamma_Y \\ -\cos \gamma_X \sin \gamma_Y \\ \cos \gamma_X \cos \gamma_Y \end{pmatrix} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix}$$

式中, $\gamma_{X,Y} = \arctan(k_{X,Y})$ 。根据其到散射中心的方向矢量 $\hat{\boldsymbol{r}}_S$ 与其到雷达的方向矢量 $\hat{\boldsymbol{r}}_R$ 关于 $\hat{\boldsymbol{n}}_F$ 的对称性, 有^[14]

$$\hat{\boldsymbol{r}}_S(k_x, k_y) = \begin{bmatrix} 2e_1^2 - 1 & 2e_1 e_2 & 2e_1 e_3 \\ 2e_1 e_2 & 2e_2^2 - 1 & 2e_2 e_3 \\ 2e_1 e_3 & 2e_2 e_3 & 2e_3^2 - 1 \end{bmatrix} \cdot \hat{\boldsymbol{r}}_R$$

式中, $\hat{\boldsymbol{r}}_R = (\cos \theta_R \cos \varphi_R, \sin \theta_R \cos \varphi_R, \sin \varphi_R)^T$ 。再限定波面高度 Z_F , 则图中 $d_1 = \frac{Z_S - Z_F}{\sin \alpha}$, $d_2 = d_1 \cos \beta$, 于是多径延迟

$$\Delta r = d_1 + d_2 = \frac{Z_S - Z_F}{\sin \alpha} (1 + \cos \beta) \stackrel{\text{def}}{=} \zeta(k_x, k_y) (Z_S - Z_F) \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} \zeta(k_x, k_y) &= \frac{1 + \cos \beta(k_x, k_y)}{\sin \alpha(k_x, k_y)} \\ \alpha(k_x, k_y) &= \arccos(\hat{\boldsymbol{r}}_S \cdot (-\hat{\boldsymbol{y}})) \\ \beta(k_x, k_y) &= \arccos(\hat{\boldsymbol{r}}_S \cdot \hat{\boldsymbol{r}}_R) \\ \hat{\boldsymbol{y}} &= (0, -1, 0)^T \end{aligned}$$

同样, 考虑到场景中的几何关系, 需要限制 $\hat{\boldsymbol{n}}_F \cdot \hat{\boldsymbol{r}}_R > 0, \hat{\boldsymbol{r}}_S \cdot (0, 0, 1)^T > 0$, 及 $Z_F < Z_S$ 。

3 多径延迟概率模型

3.1 精确模型及其验证

显然, 根据式(2)和式(3), 多径延迟的不确定性完全来源于海面波高和斜率的概率分布。考虑到三维场景表达式过于复杂, 这里仅给出二维场景下的概率模型。

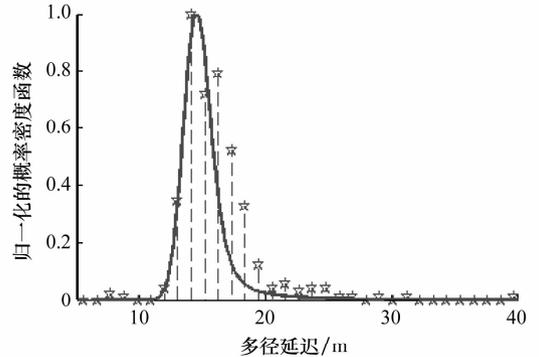
结合式(1)和式(2)可以得到

$$p(\Delta r) = \int_{K_1}^{K_2} p_{H,K}(h = H_S - \frac{\Delta r}{\xi(k)}, k) \frac{1}{|\xi(k)|} dk \quad (4)$$

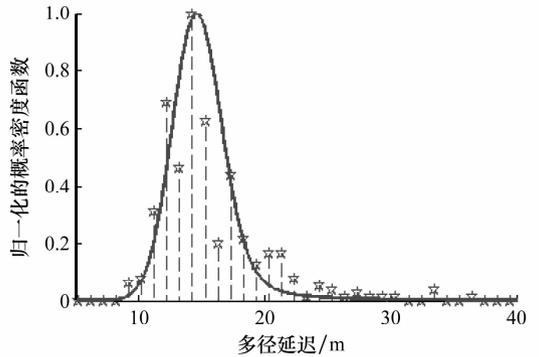
这便是高度为 H_S 的散射中心在雷达回波中多径延迟的概率模型。下面以电磁仿真实验对该模型进行验证。

计算场景的目标为一个直径 1 m 的小球, 置于网格边长 0.05 m × 0.05 m 的高斯随机粗糙面上, 高度为 10 m。电磁波以 500~700 MHz 的步进频率从 45° 方向照射该场景。取海面特征参数 $(\sigma_h, \sigma_k) = (0.65, 0.15), (1.28, 0.15)$, 及 $(0.65, 0.08)$ 。图 3 首先以实线给出了各组参数下式(4)所得的 PDF 曲线; 然后在每组参数下各生成 200 个随机粗糙面, 以电磁计算仿真得到一维距离像, 求出直达回波与最强多径回波对应距离像峰值之间距离差, 绘制其直方图, 如图 3 中的虚线和星号所示(为便于比较, 两组数

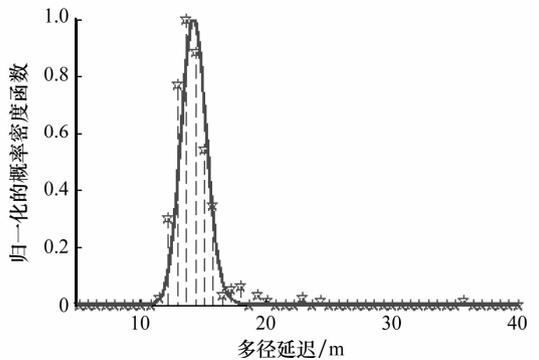
据均为归一化结果, 并且考虑到电磁波的双程传播, 图中所示其实是二倍距离差)。



(a) $\sigma_h=0.65, \sigma_k=0.15$



(b) $\sigma_h=1.28, \sigma_k=0.15$



(c) $\sigma_h=0.65, \sigma_k=0.08$

—☆: 电磁仿真; —: 本文模型。

图 3 模型的验证

由图 3 可以看出, 式(4)所示 PDF 曲线存在一个最大概率取值, 并在其右侧形成拖尾。而不同粗糙面特征参数下的两组结果, 不论在形态上还是变化趋势上都表现出较高的一致性。此外, 对不同散射中心高度和雷达俯仰角的实验也有类似结论, 从而验证了式(4)模型的准确性和有效性。

3.2 模型的近似处理

由于式(4)结果只能以数值积分形式求出, 不便应用, 这里对其进行简化和近似。

首先,令 $s_1 = s_2 = 0$, 于是对每个 k , 式(4)积分号里面的部分可以写成如下形式:

$$q(\Delta r; k) = \frac{\exp\left[-\frac{k^2}{2\sigma_k^2}\right]}{2\pi\sigma_h\sigma_k\xi(k)} \exp\left[-\frac{(\Delta r - H_s\xi(k))^2}{2\sigma_h^2\xi^2(k)}\right]$$

因此, $p(\Delta r)$ 可以看作一组关于 Δr 的高斯曲线的加权累积, 其中每条高斯曲线的均值 $\mu = H_s\xi(k)$, 标准差 $\sigma = \sigma_h\xi(k)$, 权值 $w = \frac{1}{2\pi\sigma_h\sigma_k\xi(k)} \exp\left[-\frac{k^2}{2\sigma_k^2}\right]$, 如图 4 所示。由于当 k 远离 0 值时, $q(\Delta r; k)$ 曲线的权值(即最大值)会迅速减小并趋于零, 近似积分可只考虑 $k_0 = 0$ 附近的部分(例如式(5)中的 $[-\epsilon, \epsilon]$)。而此时 $\xi(k) \approx \xi(0) = 2\sin\varphi_R$, 于是式(4)近似为

$$p(\Delta r) = \int_{K_1}^{K_2} q(\Delta r; k) dk \approx \int_{-\epsilon}^{\epsilon} q(\Delta r; k) dk \approx \int_{-\epsilon}^{\epsilon} \frac{\exp\left[-\frac{k^2}{2\sigma_k^2}\right]}{2\pi\sigma_h\sigma_k \cdot 2\sin\varphi_R} \exp\left[-\frac{(\Delta r - 2H_s\sin\varphi_R)^2}{2(2\sigma_h\sin\varphi_R)^2}\right] dk \stackrel{\text{def}}{=} A(\varphi_R, \sigma_h, \sigma_k) \cdot \exp\left[-\frac{(\Delta r - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] \quad (5)$$

式中

$$A(\varphi_R, \sigma_h, \sigma_k) = \frac{\int_{-\epsilon}^{\epsilon} \exp\left[-\frac{k^2}{2\sigma_k^2}\right] dk}{4\pi\sigma_h\sigma_k \sin\varphi_R}$$

$$\mu_0 = 2H_s \sin\varphi_R; \sigma_0 = 2\sigma_h \sin\varphi_R$$

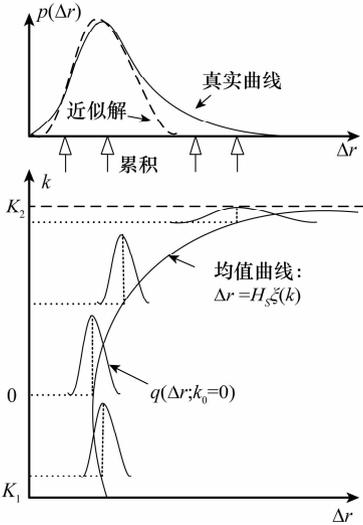
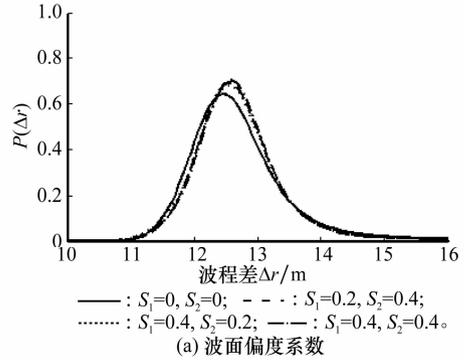


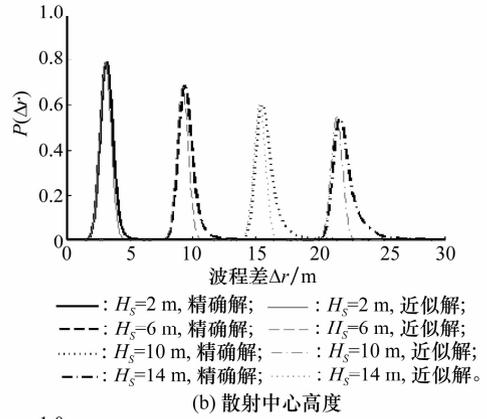
图 4 $p(\Delta r)$ 近似求解

式(5)表明, $p(\Delta r)$ 的主要部分可以近似为均值 μ_0 , 标准差 σ_0 的正态分布。图 5(b)~图 5(d)以浅色曲线给出了式(5)近似解随各参数的变化情况。对比数值计算结果(图 5深色线)可以看出, 二者的差异主要在两个方面: 一是近似曲线的最大概率多径延迟取值较真实曲线略微偏小, 二是近似曲线呈对称分布, 不存在右侧的拖尾。尽管如此,

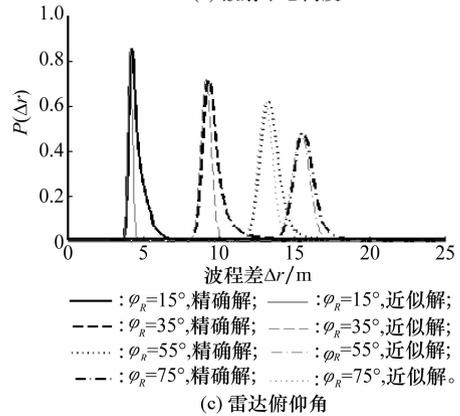
二者在最大值附近的曲线形态仍然非常相似, 并且随各参数的变化趋势也基本一致。



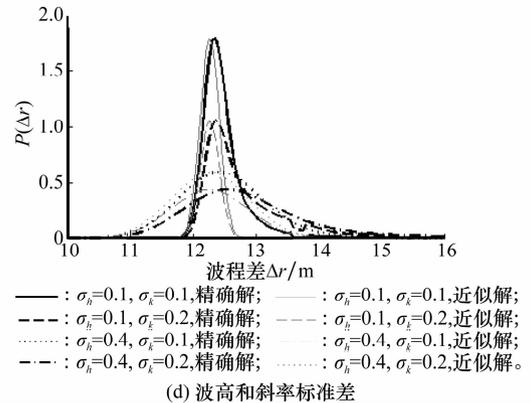
(a) 波面坡度系数



(b) 散射中心高度



(c) 雷达俯仰角



(d) 波高和斜率标准差

图 5 场景参数对 $p(\Delta r)$ 的影响

3.3 场景参数对模型的影响

式(4)的结果主要与散射中心高度, 雷达俯仰角, 以及海面的波高-斜率 PDF 参数有关。图 5 用深色曲线分别给出了不同参数取值下的 $p(\Delta r)$ 曲线。所涉及的具体参数, 除各图标注外均列于表 1。

表 1 图 5 中公共参数的取值

偏度系数 s_1	0	偏度系数 s_2	0
散射中心高度 H_s/m	8	雷达俯仰角 $\varphi_R/(^\circ)$	50
波高标准差 σ_h/m	0.3	斜率标准差 σ_k/m	0.15

从图 5(a)可以看出, 波面偏度系数虽然会造成概率曲线峰值的偏移, 但偏移量并不大。图 5(b)~图 5(d)分别以深色和浅色线条给出了式(4)精确解和式(5)近似解在不同参数下的结果。其中, 相同参数下的精确解和近似解被归一化成具有相同的最大值, 以便进行对比。尽管存在前述差异, 两类曲线还是表现出如下相似的变化趋势: 随着散射中心高度的增加, 曲线几乎与之成正比的向右移动, 并发生略微展宽(近似曲线没有展宽); $\sin \varphi_R$ 的增加会造成曲线近似正比的右移和展宽; 波高和斜率标准差增大时, 曲线显著展宽, 但平移不显著。

4 模型应用举例

4.1 二维场景: 水平海面条件成立的判定

水平海面假设虽然常常与实际不符, 但却能简化多径问题的处理, 因此得到了广泛的应用^[1-2,7]。在二维场景中, 水平海面对应的 $p(\Delta r) = \delta(\Delta r - \mu_0)$, 这相当于式(5)中 $\sigma_0 \rightarrow 0$ 。而对起伏海面情形, 考虑到直达波与二次反射多径回波的距离像位置差为 Δr , 如果近似模型(5)中高斯曲线的 $6\sigma_0$ 展宽(包含了约 99.7% 的概率取值)小于相应一维距离像的分辨率, 则可以认为海面的起伏对多径延迟的影响与水平海面没有显著区别。由此得到水平海面判定条件:

给定一维距离像的分辨率 ρ_r , 如果海面波高均方根 $\sigma_h \leq \rho_r / 12 \sin \varphi_R$, 则认为此时的海面可以视为水平面。(例如当 $\rho_r = 1 \text{ m}$, $\varphi_R = 45^\circ$ 时, 该判据要求 $\sigma_h \leq 0.12 \text{ m}$ 。)

瑞利判据的条件为 $\sigma_h \leq \lambda / 8 \sin \varphi_R$ ^[15]。本文所给的判定临界值与瑞利判据一样, 都反比于 $\sin \varphi_R$; 而二者比例系数的取值往往也大致相当。

4.2 二维场景: 散射中心高度的最大后验概率估计

水平海面假设下, 散射中心高度与多径延迟存在确定的关系, 因此可以通过估计多径延迟来获得散射中心的高度值^[1]。而在起伏海面情形下, 由于式(5)近似表达式中只

有 μ_0 与散射中心高度 H_s 有关, 如果将其视为条件概率 $p(\Delta r | H_s)$, 根据 Bayes 公式, $p(H_s | \Delta r) \propto p(\Delta r | H_s) \cdot p(H_s)$, 则也可以在不同的 $p(H_s)$ 先验概率假设下讨论 H_s 的最大后验概率估计。例如, 若 H_s 先验服从 $[H_1, H_2]$ 区间上的均匀分布, 则

$$p(H_s | \Delta r) \propto \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_1^2} (H_s - \mu_1)^2 \right]$$

式中, $\mu_1 = \frac{\Delta r}{2 \sin \varphi_R}$, 与水平海面结果相同; $\sigma_1 = \frac{\sigma_0}{2 \sin \varphi_R} = \sigma_h$ 。又若 H_s 先验服从正态分布 $N(\mu_H, \sigma_H)$ (某些舰船上接近甲板高度的散射中心数量可能多于更高或更低处), 则

$$p(H_s | \Delta r) \propto \exp \left[-\frac{(H_s - \mu_H)^2}{2\sigma_H^2} \right] \exp \left[-\frac{(H_s - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} \right] \exp \left[-\frac{(H_s - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2} \right]$$

$$\text{式中, } \mu_2 = \frac{\mu_H \sigma_1^2 + \mu_1 \sigma_H^2}{\sigma_H^2 + \sigma_1^2}; \sigma_2^2 = \frac{\sigma_H^2 \sigma_1^2}{\sigma_H^2 + \sigma_1^2}.$$

因此, 当利用多径延迟估值 $\Delta \hat{r}$ 对起伏海面上的散射中心的高度进行估计时, 如果认为高度的先验服从均匀分布, 则水平海面假设下的结果就是其最大后验概率估计; 但若认为散射中心高度服从正态分布, 则需对水平海面结果稍作修正。

4.3 三维场景: 海面舰船 SAR 图像仿真

假设雷达从方位角 50° , 俯仰角 60° 附近的方向上照射目标, 发射信号中心频率 1.3 GHz 。舰船由位于棱边和顶点的散射中心表示, 回波信号由各散射中心直达回波和海面一、二次反射回波(如果存在的话)叠加而成^[2]。图 6 分别给出了无海面、水平海面和起伏海面情况下仿真的目标 SAR 图像, 两个方向分辨率均为 1.25 m 。其中对起伏海面, 首先按照文献[12]中的波高-二维斜率 PDF(取波高标准差 $\sigma_h = 0.7 \text{ m}$, 两个方向斜率标准差 $\sigma_x = \sigma_y = 0.2$, 且被简化为三维正态分布)为每个散射中心生成反射波面, 然后按式(3)确定可见的多径传播路径和回波中的延迟量。

相比于图 6(a)、图 6(b)中存在轮廓清晰的两组伪像, 这是由靠近雷达一侧的舰船散射中心分别经海面一次和二次反射形成的。而图 6(c)中, 反射波面的起伏性使多径像的结构特征不再明显, 并且存在一定程度的模糊。后一现象是由于恰当的反射波面只存在于部分成像孔径而导致的分辨率降低。因此, 在低海况情况下, 多径传播会在目标 SAR 图像中形成规则清晰的“重影”, 其影响不能忽视, 但却在一定程度上反映了目标的外形特征, 应该加以利用; 而在高海况情况下, 多径像的分布更近似于海浪杂波, 因而往往不需要特殊处理。

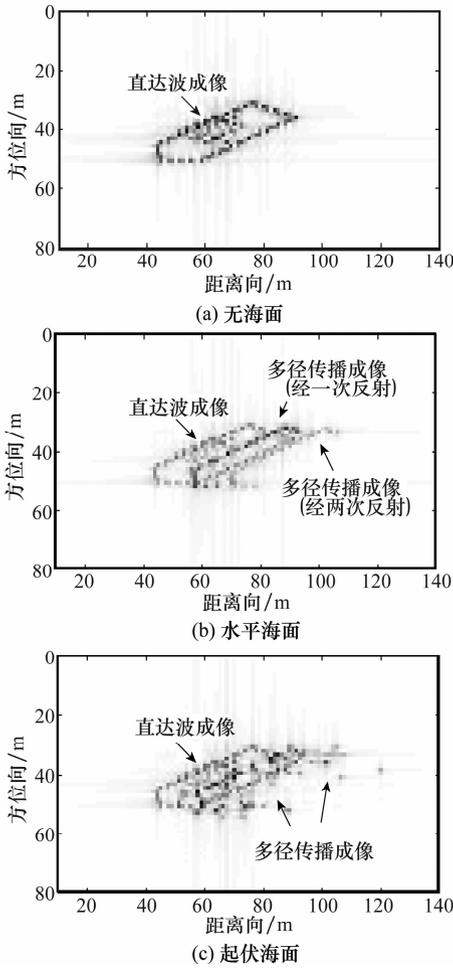


图6 舰船 SAR 图像仿真

5 结论

通过对海面赋予基尔霍夫近似并引入波高-斜率的联合 PDF,本文给出了起伏海面上散射中心雷达回波中多径延迟量的概率模型。通过仿真实验分析验证了散射中心高度,雷达俯仰角以及海面波高、斜率标准差等场景参数对模型的影响。结果表明,该模型既能比水平海面近似更好地符合客观实际,又能避免电磁仿真技术的复杂运算,进而显示了其在海面目标识别领域广阔的应用前景。

参考文献:

[1] Liu H W, Su H T, Shui P L, et al. Multipath signal resolving and time delay estimation for high range resolution radar[C]// *Proc. of the IEEE International Radar Conference*, 2005: 497 - 502.

[2] Berizzi F, Diani M. Multipath effects on ISAR image reconstruction[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, 1998, 34(2): 645 - 653.

[3] He S Y, Deng F S, Chen H T, et al. Range profile analysis of the 2-D target above a rough surface based on the electromagnetic numerical simulation[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2009, 57(10): 3258 - 3263.

[4] Deng F S, He S Y, Chen H T, et al. Numerical simulation of vector wave scattering from the target and rough surface composite model with 3-D multilevel UV method[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2010, 58(5): 1625 - 1634.

[5] Burkholder R J, Pino M R, Obelleiro F. A Monte Carlo study of the rough-sea-surface influence on the radar scattering from two-dimensional ships[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2001, 43(2): 25 - 33.

[6] 许小剑, 姜丹, 李晓飞. 时变海面舰船目标动态雷达特征信号模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(1): 42 - 47. (Xu X J, Jiang D, Li X F. Modeling of dynamic radar signatures for ships on time-varying sea surface[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(1): 42 - 47.)

[7] Blake L V. *Radar range-performance analysis*[M]. 2nd ed. Norwood, MA: Artech House, 1986.

[8] Garren D A, Goldstein J S, Obuchon D R, et al. SAR image formation algorithm with multipath reflectivity estimation[C]// *Proc. of the IEEE International Radar Conference*, 2004: 323 - 328.

[9] 王亮, 练有品, 周智敏, 等. 抑制多径干扰的 UWB SAR 成像研究[J]. *信号处理*, 2007, 23(3): 403 - 406. (Wang L, Lian Y P, Zhou Z M, et al. Research on UWB SAR image formation with suppressing multipath ghosts[J]. *Signal Processing*, 2007, 23(3): 403 - 406.)

[10] Tsang L, Kong J A, Ding K, et al. *Scattering of electromagnetic waves: theories and applications*[M]. New York: Wiley, 2001.

[11] 郭立新, 王运华, 吴振森. 修正双尺度模型在非高斯海面散射中的应用[J]. *电波科学学报*, 2007, 22(2): 212 - 218. (Guo L X, Wang Y H, Wu Z S. Application of modified two-scale model for scattering from non-Gaussian sea surface[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, 22(2): 212 - 218.)

[12] Srokosz M A. On the joint distribution of surface elevation and slopes for a nonlinear random sea, with an application to radar altimeter[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(C1): 995 - 1006.

[13] Huang N E, Long S R, Bliven L F, et al. The non-Gaussian joint probability density function of slope and elevation for a nonlinear gravity wave field[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(C2): 1961 - 1972.

[14] 苏步青, 华宣积. *应用几何教程*[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1990: 54 - 56. (Su B Q, Hua X J. *A course for applied geometry*[M]. Shanghai: Fudan University Press, 1990: 54 - 56.)

[15] Kerr D E. *Propagation of short radio waves*[M]//New York: McGraw-Hill, 1951.