

基于电磁模型的宽带雷达海杂波信号建模与分析

王童^{*①} 童创明^① 许光飞^② 彭鹏^① 王宜进^①

^①(空军工程大学防空反导学院 西安 710051)

^②(63892部队 洛阳 471003)

摘要: 该文针对时变海洋面雷达回波信号模拟问题, 建立了一种包含电磁散射机理与雷达波形调制特征的海杂波雷达回波信号模型。该模型首先建立一组具有时变特征的海面几何样本, 通过对改进双尺度面元模型的加速处理, 实现各时刻海面散射数据的高效模拟, 并通过与测试数据的对比证实了电磁计算方法的准确性, 然后采用子脉冲形式建立宽带回波信号模型, 并以各面元散射数据代替其复幅度从而完成雷达回波信号建模。通过仿真验证了模型的合理性与高效性, 对海杂波数据的统计分析展示了脉冲压缩处理对杂波的抑制效果。该海杂波模型既考虑了海洋的复杂散射机理与运动特性, 又具有一般宽带信号的形式, 因此可同时为海洋散射现象的解释和信号处理算法的分析提供完备数据源。

关键词: 宽带雷达; 电磁散射; 海杂波; 双尺度面元模型

中图分类号: TN959.72; TN011

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)04-1358-08

DOI: 10.11999/JEIT210180

Modeling and Analysis of Sea-clutter Signal for Wide-band Radar Based on Electromagnetic Model

WANG Tong^① TONG Chuangming^① XU Guangfei^②

PENG Peng^① WANG Yijin^①

^①(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

^②(Unit 63892 of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: For the radar signals simulations of time-varying ocean surface, a radar signal model of sea clutter incorporating the electromagnetic scattering mechanism and radar signal modulation characteristics is developed. First, a set of time-varying sea surface geometric samples are constructed, and an efficient simulation of sea scattering at each time is performed by accelerating the calculation of the improved facet-based two-scale model, and the accuracy of the electromagnetic calculation method is demonstrated by comparing with the measured data. Then the band-wide echo signal model is established in the form of sub-pulse, and the scattering data of each surface element is replaced with its complex amplitude to complete the radar signal modeling. In simulations, the rationality and efficiency of the electromagnetic model are verified, and the statistical analysis of sea clutter data shows the effect of pulse compression on clutter suppression. This sea clutter model not only takes into account of the complex scattering mechanism and motion characteristics of the ocean, but also has the form of a general band-wide signal, so it can provide comprehensive source data for the interpretation of ocean scattering phenomena and the analysis of signal processing algorithms.

Key words: Wide band radar; Electromagnetic scattering; Sea clutter; Facet-based two scale model

1 引言

雷达在实施海洋环境监测和目标识别时, 其接

收到的海杂波是电磁波与海表面相互作用的结果, 所以研究海洋的电磁散射机理对分析杂波特点、开发检测算法和获取海洋信息具有重要意义。但雷达接收机接收的杂波是海面电磁散射数据与经过调制的雷达发射信号的卷积, 其接收到的信号不仅受散射机理影响, 还与雷达工作模式密切相关^[1]。随着各种新体制雷达的陆续使用, 单纯的电磁散射数据和缺乏物理机理的随机序列均已不能满足杂波仿真的需求, 而具有海面局部散射信息且受发射波形调

收稿日期: 2021-03-01; 改回日期: 2021-10-25; 网络出版: 2021-11-13

*通信作者: 王童 tong_wang001@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61901510); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2021JQ-365)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61901510), The Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (2021JQ-365)

制的电磁信号对于雷达仿真领域更具有吸引力^[2,3]。

经典的杂波仿真是产生服从一定分布规律的随机序列^[4-6], 典型的杂波分布有瑞利、对数、威布尔和K分布^[7], 这些分布或来源于对实测数据的拟合, 亦或者是在散射机理分析基础上通过数学推演而来。该类方法简单高效, 对于多种雷达体制的信号模型都十分易于添加^[8-10]。但对于不同雷达参数与环境类型下的杂波序列, 需要谨慎选择恰当分布模型及其参数, 同时该方法无法体现环境与电磁波相互作用的物理机理, 对于非均匀环境或者存在目标环境相互作用机理时, 这种方法很难获得较好结果。除了统计模型, 还有一种基于电磁散射的杂波模拟方法。该方法建立在确定的起伏环境表面与电磁散射计算方法基础上, 环境表面被离散为大量起伏的小面元, 每个小面元上的散射场通过电磁计算方法获得^[11]。就当前研究而言, 该类方法多集中在海洋多普勒^[12-15]和合成孔径雷达原始回波信号^[16-18]的模拟领域, 并没有一种更为普遍的电磁信号模型, 而且模拟过程高度依赖电磁模型的计算效率, 对于大区域的时变海杂波模拟十分受限。

本文首先利用蒙特卡洛法建立时变的海面几何模型, 然后在前期电磁散射模型研究的基础上^[19,20], 通过对双尺度面元散射模型的加速处理, 实现时变海面散射数据的快速仿真。然后在电磁模型与线性调频信号基础上, 建立时变海洋的宽带回波信号模型。最后对电磁模型进行了验证, 同时对宽带海杂波的统计特性进行了分析讨论。

2 时变海洋面生成方法

海面某一时刻几何样本可以通过蒙特卡洛法(也称为线性滤波法)获得。该方法将粗糙面视为平稳随机过程, 在频域通过相应的谱函数对高斯白噪声进行滤波, 然后再通过傅里叶逆变换变换到空间域得到具有相应谱特征的起伏表面。对于随时间变化的海洋面其每个离散时刻的几何样本具有时间相关性, 时变海洋面可表示为

$$f(x, y, t) = \frac{1}{L_x L_y} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_{mn}(K_{xm}, K_{yn}, t) \cdot \exp\left(\frac{j2\pi mx}{L_x}\right) \exp\left(\frac{j2\pi ny}{L_y}\right) \quad (1)$$

其中, L_x, L_y 分别为 x, y 方向的粗糙面的长度, K_{xm}, K_{ym} 分别为 x, y 方向的空域频率的离散点, b_{mn} 为与海谱函数有关的复系数。式(1)为离散傅里叶逆变换的形式, 通过式(1)可将频域的海谱变化到具有相应谱特性的空间域。如果获得了0时刻的海面起伏信息, 通过用0时刻的海谱乘以 $\exp(j\omega t)$ 就可以得到 t 时刻的海谱信息, 时间变化项中的频率为

$$\omega = \sqrt{g_0 K} \quad (2)$$

其中, g_0 为重力加速度, K 表示空间波矢量 \mathbf{K} 的模值且有 $K^2 = K_{xm}^2 + K_{ym}^2$, 该项对海面起伏速率起到调制作用。在生成固定尺寸的时变海面序列时, 由于不同样本的空间矢量分布是相同的所以只需计算一次 ω 。这时式(1)中的 b_{mn} 可表示为

$$b_{mn} = 2\pi e^{-j\omega t} \sqrt{L_x L_y W(K_{xm}, K_{ym})} \begin{cases} \frac{N(0, 1) + jN(0, 1)}{\sqrt{2}}, & m \neq 0, N_x/2, n \neq 0, N_y/2 \\ N(0, 1), & m = 0, N_x/2 \text{ 或 } n = 0, N_y/2 \end{cases} \quad (3)$$

$N(0, 1)$ 为均值为0、方差为1的正态分布, $W(k_{xm}, k_{ym})$ 为谱函数的2维形式。借助式(1)的快速傅里叶逆变换, 蒙特卡洛法具有很高的生成效率, 在本文中海洋谱函数 $W(k_{xm}, k_{ym})$ 选择 Elfouhaily 模型, 具体形式可参考文献^[21]。图1即为时变海洋面不同时刻的1维轮廓信息, 相邻样本时间间隔为0.02s。在计算时变海洋面的散射场时, 我们认为每个离散时刻, 海面是静止的, 这样便可借助电磁模型得到具有时变特征的海面散射场。

3 电磁散射模型

双尺度模型(Two Scale Model, TSM)示意如图2, 定义全局坐标系 $\{x, y, z\}$ 与局部坐标系 $\{x_1, y_1, z_1\}$ 。此时的局部坐标系为粗糙面离散后的小面元, 面元沿 x 方向的斜率 z_x 可以通过对其面元中心点沿 x 方向取差分获得, 同理沿 y 方向的斜率 z_y 也可获得。全局坐标系下, 电磁波的入射与散射角度为 $(\theta_i, \theta_s, \phi_i, \phi_s)$ 。 \mathbf{K}_i 与 \mathbf{K}_s 分别是入射与散射矢量, \mathbf{k}_i 与 \mathbf{k}_s 为局部坐标系下的入射与散射矢量, 且有 $\mathbf{k}_i = \mathbf{k}_0 - q_0 \hat{z}_1$, $\mathbf{k}_s = \mathbf{k} + q_k \hat{z}_1$ 。其中 \mathbf{k}_0 和 \mathbf{k} 分别为入射波 \mathbf{k}_i 和散射波 \mathbf{k}_s 在面元水平方向投影矢量, q_0 和 q_k 为相应的垂直分量值, 可以认为每一个小面元具有相同水平尺寸即 $\Delta x = \Delta y$ 。

粗糙面散射特性多以归一化雷达散射截面

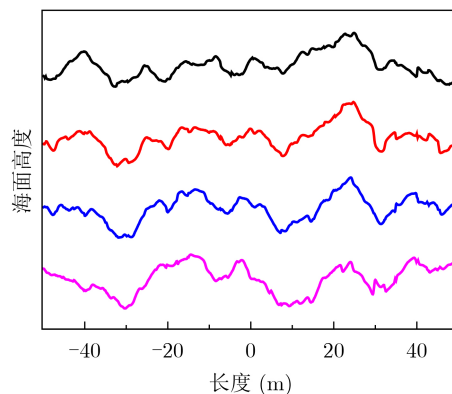


图1 时变海面轮廓

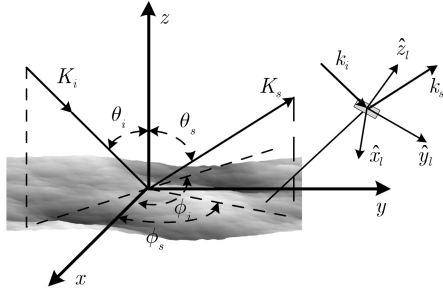


图2 面元散射示意图

(Normalized Radar Cross Section, NRCS)^[22]表示, 基于TSM面元模型的NRCS为

$$\sigma_{pq} = \frac{\nu(\theta_i, \theta_s)}{A} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left[(\sigma_{ij}^{\text{GO}} + \sigma_{ij}^{\text{SPM}}) \Delta x \Delta y \right]_{\substack{z_{yij} \in [\beta_{ij}] \\ z_{xij} \in [\delta_{ij}] |\theta_{ij}| > -\cot \theta_i}} \quad (4)$$

其中, σ_{ij}^{GO} 为第 (i, j) 面元的镜面反射分量, σ_{ij}^{SPM} 则为该面元的漫散射分量, p 和 q 分别为散射波和入射波的极化形式, $\nu(\theta_i, \theta_s)$ 为遮挡因子, M 和 N 分别为 x 和 y 方向的面元数, A 表示海面面积, 考虑到遮挡效应, 面元斜率不小于 $-\cot \theta_i$ 。基于TSM的面元模型在海面散射模拟及成像研究方面得到了广泛应用, 特别是对于大尺寸非均匀海面散射的快速模拟具有较明显的优势。然而使用该类模型需要面对两个不可回避的问题, 第1个是TSM所固有的截断波数选取问题, 第2个则是面元化过程引起的面元尺寸选取问题。这两个参数的选取缺乏严格的理论基础, 实际使用中往往基于经验值, 但众多研究表明参数值与入射角和海况条件密切相关, 单一经验值很难适用于所有仿真场景。在前期的研究中我们讨论了一种基于几何光学-小斜率近似(Geometrical Optics-Small Slope Approximation, GO-SSA)的双尺度模型。该模型中以SSA替换传统双尺度模型中微扰法(Small Perturbation Method, SPM), 并修正镜向反射的表示形式, 使得最终结果不受截断波数的影响。在对其进行面元化的过程中, 考虑到镜向反射分量的GO解对面元尺寸的变化更为敏感, 所以对其GO解中的斜率概率密度函数(Probability Density Function, PDF)进行修正, 从而建立了在一定范围内不受面元尺寸变化影响的散射模型, 这里直接给出其NRCS的表示形式。

$$\sigma_{pq} = \frac{\nu(\theta_i, \theta_s)}{A} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left(\sigma_{ij}^{\text{MGO}} \exp(-q^2 h_s^2) (1 - \exp(-q_z^2 h_L^2)) + \sigma_{ij}^{\text{SSA}} \right) \Delta x \Delta y \Big|_{\substack{z_{yij} \in [\beta_{ij}] \\ z_{xij} \in [\delta_{ij}] |\theta_{ij}| > -\cot \theta_i}} \quad (5)$$

其中, σ^{MGO} 为斜率PDF修正后的几何光学解, 其具体数学形式参见文献[20], σ_{SSA1} 为1阶SSA解, h_L 和 h_s 分别为大小尺度波的均方根, 矢量 $\mathbf{q} = \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i$, q 为其模值大小, q_z 为其 z 轴方向分量的大小。该模型在保证精度的同时, 克服了截断波数与面元尺寸对传统面元双尺度模型的限制, 为采用大面元对雷达回波进行仿真模拟建立了基础。但是相比传统模型, 式(5)中的 σ_{SSA1} 项明显增加了计算量, σ_{SSA1} 的表示形式为

$$\sigma_{pq}^{\text{SSA1}}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) = \frac{1}{\pi} \left| \frac{2q_k q_0}{q_k + q_0} B_{pq}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) \right|^2 \exp\left(-(q_k + q_0)^2 C(0)\right) \times \int \left\{ \exp\left[(q_k + q_0)^2 C(\mathbf{r})\right] - 1 \right\} \times \exp[-j(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{r}] d\mathbf{r} \quad (6)$$

其中, $B_{pq}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0)$ 为极化因子可参见文献[23], $C(\mathbf{r})$ 为粗糙面的相关函数。式(5)中的模型需要对每一个面元的非镜向散射采用如式(6)的计算过程, 这种计算量对于处理单个电大尺寸海面的散射或成像问题尚可接受, 但时变海面的仿真需要反复计算大量不同时刻海面样本的散射数据, 这时仿真效率问题变得尤为突出。这里需要提高式(6)的计算速度, 以使其能够成为本文宽带杂波仿真的有效电磁仿真工具。式(6)积分部分的指数项可以通过级数展开近似为

$$\exp((q_k + q_0)^2 C(\mathbf{r})) - 1 \approx \sum_{n=1}^N \frac{(q_k + q_0)^{2n}}{n!} C^n(\mathbf{r}) \quad (7)$$

$C^n(\mathbf{r})$ 与海谱函数 $W(\mathbf{K})$ 具有式(8)关系

$$W^n(\mathbf{K}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \exp(-j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) C^n(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (8)$$

当 $n=1$ 时 $W^1(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0) = W(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0)$, 将式(7)代入式(6), 并利用式(8)中的关系, 可以得到

$$\begin{aligned} \sigma_{pq}^{\text{SSA1}}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) &= 16\pi^2 q_k^2 q_0^2 |B_{pq}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0)|^2 \\ &\quad \cdot \exp\left(-(q_k + q_0)^2 C(0)\right) \\ &\quad \times \sum_{n=1}^N \frac{(q_k + q_0)^{2n-2}}{n!} \frac{1}{(2\pi)^2} \\ &\quad \int C^n(\mathbf{r}) \exp[-j(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{r}] d\mathbf{r} \\ &= 16\pi^2 q_k^2 q_0^2 |B_{pq}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0)|^2 \\ &\quad \cdot \exp\left(-(q_k + q_0)^2 C(0)\right) \\ &\quad \cdot \sum_{n=1}^N \frac{(q_k + q_0)^{2n-2}}{n!} W^n(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0) \quad (9) \end{aligned}$$

可以观察到当 $N=1$ 时有

$$\begin{aligned}\sigma_{pq}^{\text{SSA1}}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) &= 16\pi^2 q_k^2 q_0^2 |B_{pq}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0)|^2 W(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0) \\ &\quad \cdot \exp\left(-(q_k + q_0)^2 C(0)\right) \\ &= \sigma_{pq}^{\text{SPM}} \exp\left(-(q_k + q_0)^2 C(0)\right)\end{aligned}\quad (10)$$

即最低阶的SSA1即为SPM与式(10)中指数项的乘积。实际上 $\sqrt{C(0)}$ 即为表面的均方根高度 h , 当 $(q_k + q_0)h \ll 1$ 时(即为SPM的适用条件), 指数项趋近于1, 最低阶的SSA1退化为SPM。式(9)中 W^n 的计算可以通过式(8)并借助快速傅里叶变换获得, 而且由于 W^n 的计算与入射与散射矢量均无关, 所以只需计算1次 W^n 项并存储, 对于其他不同入射或散射角的情况可直接使用而无需计算, 这就大大提高了NRCS的计算效率。阶数 N 与雷达波频率、入射角与海面风速均有关, 实际仿真中在Ku波段 $N=50$ 即能获得较好的收敛结果。

上述面元模型只提供了粗糙面局部散射的幅度信息, 没有包含相位信息, 而从回波信号角度分析, 接收信号的相位信息包含了每个面元的位置和运动信息, 所以为了与信号模型相匹配, 包含相位信息的散射场为

$$E_{pq} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{\exp(jkR)}{R} \sqrt{\frac{\Delta x \Delta y}{4\pi}} \sigma_{pq} \exp(-j\varphi_{mn}) \right\}\quad (11)$$

R 为雷达到粗糙面中心处的距离。相位项 φ_{mn} 可以表示为

$$\varphi_{mn} = \Delta\varphi_{mn}^{\max} \zeta + \Delta\rho_{mn}\quad (12)$$

其中, $\Delta\varphi_{mn}^{\max}$ 为第 mn 面元内最大的相位差, $\zeta \in [-1/2, 1/2]$ 为一均匀分布的随机数。 $\Delta\rho_{mn} = \mathbf{k}_d \cdot \mathbf{r}_{mn}$ 为第 mn 面元的相对位置引起的相位差, \mathbf{r}_{mn} 为面元相对坐标原点的位置矢量。利用式(5)、式(9)和式(11)可完成海面局部散射场的快速计算, 从而为宽带海杂波的模拟提供高效的电磁信号仿真模型。

4 宽带线性调频雷达回波信号

对于宽带雷达回波信号, 由于距离分辨率的增加, 单个脉冲含有多个分辨单元, 所以在信号建模时需要将脉冲进一步细分。有的学者采用子脉冲形式, 即认为每个脉冲由 N_b 个相等子脉冲组成, N_b 为单个脉冲内含有分辨单元数。还有的学者采用子带形式, 即将宽带信号划分成一系列子带信号, 每个子带信号可以近似认为常规信号。两种方法的思路是一致的, 只不过一个从时域出发, 另一个从频域出发。这里我们采用子脉冲信号形式, 则发射信号可重新写为

$$\begin{aligned}s_t(t) &= \sum_{i=0}^{N_b-1} \exp[j2\pi(f_0 t + Kt^2/2)] \text{rect}\left(\frac{t - i\tau_p}{\tau_p}\right), \\ 0 \leq t \leq T_p\end{aligned}\quad (13)$$

其中, f_0 为载频信号频率, $K=B/T_p$ 为线性调频率, B 为线性调频信号带宽, τ_p 为子脉冲宽度。在回波信号建模中, 根据雷达分辨单元在水平面上的投影将波束照射区域划分为 N_s 个子区域, 每个区域对应的距离维长度为一分辨单元即 $c/2B$ (c 为光速)。这里不妨认为宽带信号的距离门即为子脉冲宽度 $\tau_p = 1/B$, 这样相邻距离门的时间差为子脉冲宽度, 进入同一距离门的回波信号为前面多个距离门回波叠加的结果。对于点目标, 雷达发射的第 m 个子脉冲信号照射第 n 个雷达分辨单元后的回波信号为

$$\begin{aligned}s_n^m(t) &= \text{rect}\left(\frac{t - m\tau_p}{\tau_p}\right) A_n^m \exp(j\pi Kt^2) \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{j4\pi R_n}{\lambda} + j2\pi f_{dn} t\right), \quad 0 \leq t \leq T_p\end{aligned}\quad (14)$$

其中, R_n 与 f_{dn} 分别为第 n 个分辨单元的距离与多普勒频率。环境或者扩展目标, 都可以认为由众多点目标组成, 每个点目标的回波都会持续一个脉冲时间 T_p , 这些点目标的回波跨越多个距离门。已知宽带发射信号具有 N_b 个子脉冲, 雷达波束照射场景跨越 N_s 个距离分辨单元(距离门)。根据图3所示可知, 第 m 个子脉冲照射第 $k+1-m$ 距离分辨单元的回波信号都会出现在第 k 个距离门内。

最终对于一个脉冲重复周期内的第 k 个距离门的回波 S_k , 其信号为前面 $k-1$ 个距离分辨单元延时回波信号的叠加即

$$S_k = \sum_{n=1}^k s_n^{k+1-n}(t), \quad k = 1, 2, \dots, N_s\quad (15)$$

对于多个发射脉冲的情况, 分析也类似, 第1个脉宽内的回波与上式相同, 其余脉冲宽度内的

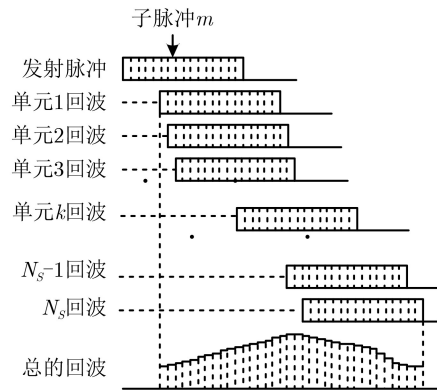


图3 宽带雷达回波示意图

则为前面 N_b-1 个距离单元回波的叠加之和。模拟式(14)中的宽带回波,关键是要确定回波的复幅度 A_n^m 。由于环境尺寸巨大并具有随机性,幅度计算具有一定困难,传统杂波序列多通过统计模型生成具有一定相关性分布特性的随机序列,本节在第3节高效电磁模型基础上,将计算获得的杂波复幅度直接用于杂波模型中,从而生成具有精细局部散射特征的电磁信号。根据面元散射理论,式(14)中雷达发射的第 m 个子脉冲信号照射第 n 个雷达分辨单元后的回波信号改写为

$$s_n^m(t) = \text{rect}\left(\frac{t - m\tau_p}{\tau_p}\right) E_n^m \exp(j\pi K t^2), \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (16)$$

其中, E_n^m 表示第 m 个子脉冲信号照射第 n 个雷达分辨单元时的复幅度,它也是分辨单元内多个小面元散射场相干叠加的结果,每个小面元的散射场通过式(11)计算。与式(14)不同的是式(16)中复幅度 E_n^m 的相位项含有海洋运动导致的多普勒分量以及相对位置不同导致的时间延迟分量,这两项分量在计算时变海洋的散射场时都已经包含在相位项中,这也是称该回波为电磁信号的原因。

5 仿真与分析

5.1 电磁模型说明

采用本文电磁模型对电磁散射特性进行仿真,

雷达频率设为14 GHz,海水介电常数为 $43.0-39.85i$,Elfouhaily海面上方10 m处风速为5 m/s。海面尺寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,面元尺寸为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。图4给出了海面1次样本与50次样本平均后的NRCS,并与SSA1的结果进行了比较。发现对于单一粗糙面样本,由于其表面随机性的起伏对相位影响十分明显,所以其NRCS在平均值附近起伏十分剧烈。当对多个样本进行计算并取平均后,其NRCS趋于平均值并与统计模型的结果十分吻合。

下面对电磁模型关于截断尺度和面元尺寸的特性进行仿真验证。参数与上一仿例保持相同,在图5(a)中,面元尺寸固定为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,观察不同截断波数的影响(图中 k_0 为自由空间波数),仿真结果显示截断波数的变化对散射结果几乎没有影响。图5(b)为不同面元尺寸对散射结果的影响,该仿例中大小尺度截断波数固定为 $k_0/6$,从该图中可以观察到,散射结果几乎不随面元尺寸变化。图5(c)展示了海面风速为10 m/s时仿真结果与Voronovich-Zavorotny实测数据的对比^[23]。图5的曲线表明了本文电磁模型在保证精度的同时,大大降低了对截断波数与面元尺寸的敏感性。

表1为采用传统双尺度面元模型、式(5)中的改进双尺度模型和本文经过式(9)加速处理后的模型的计算时间,计算尺寸为 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 海面的单站散射,计算机内存8 GB,CPU主频为3.1 GHz。

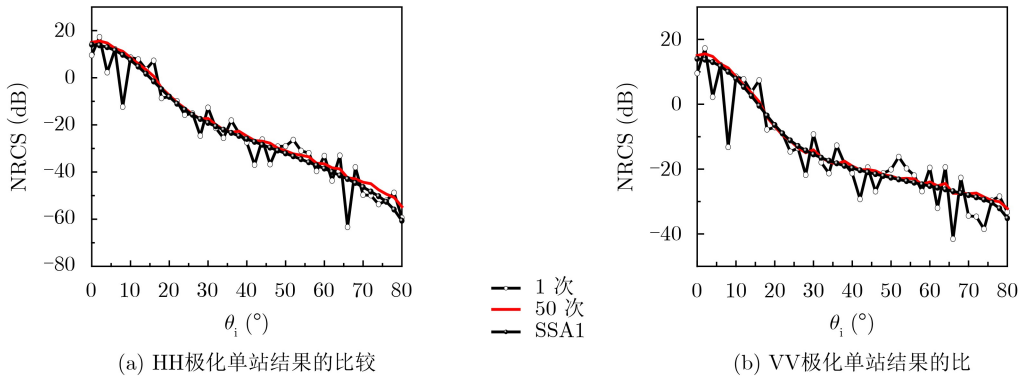


图4 海面后向散射仿真

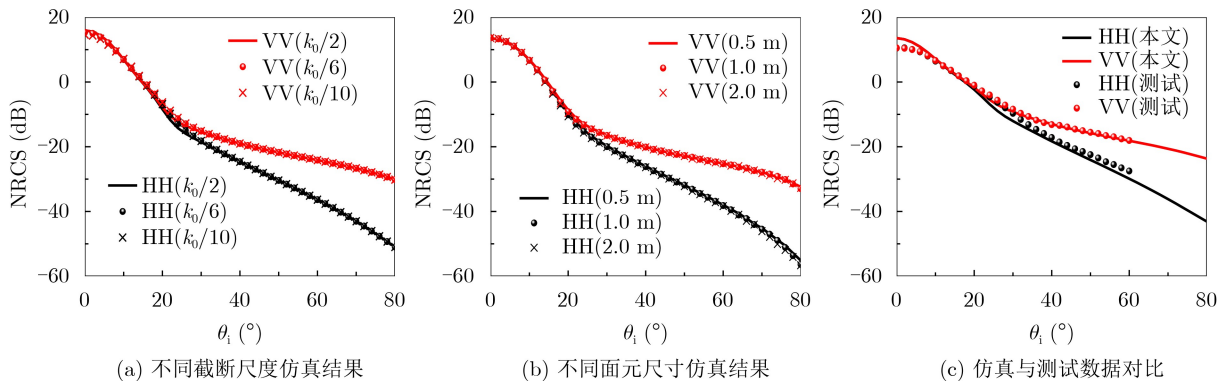


图5 电磁模型仿真与验证

表 1 仿真参数与计算时间

面元模型	粗糙面尺寸(m ²)	面元尺寸(m)	计算时间(s)
传统双尺度	200×200	0.5	136
改进双尺度	200×200	2	134
本文模型	200×200	2	36

在大于入射波长小于雷达分辨单元的范围内, 只要保证海面的几何轮廓不失真, 我们就可以依据粗糙面的大小选择面元尺寸。对于数百米乃至上千米的粗糙面场景, 完全可以选择1 m甚至数米的面元尺寸。由于SSA1的计算远比SPM复杂, 所以相比传统双尺度面元模型, 对于相同面元规模的粗糙面, 基于改进双尺度的面元模型的计算量更大。

可以看出在丢失仿真精度的同时, 借助大面元的使用, 改进的双尺度的面元模型并未增加电磁散射的计算量。这种减少计算目标数的策略, 在信号模拟阶段会进一步提升仿真效率。而改进的双尺度面元模型经过本文加速处理后, 其电磁仿真效率显著提升, 从而使得对大区域海杂波电磁信号的模拟更为高效。需要特别指出的是, 面元数量的增加会导致海面生成时间显著增加, 这也是表1中传统双尺度的计算时间远多于本文模型的原因之一。

5.2 宽带杂波仿真与分析

时变海洋面样本尺寸为100 m×100 m, 离散面元尺寸为0.5 m×0.5 m, 海面风速为5 m/s, 海水介电常数为42.08–39.45i, 模拟杂波的时间长度为10 s, 时变海面仿真的慢时间间隔为0.01s(海面生成时间间隔)。雷达载频为16 GHz, 带宽为 $B=75$ MHz, 脉冲宽度为1 μ s, 脉冲重复周期为1 ms, 入射角为60°。海面样本在雷达视线上的投影为 $100 \times \sin 60^\circ$, 相当于43个雷达分辨单元的距离长度, 由于海面上每个点的雷达波都要持续1个脉冲时间(对应距离门数或子脉冲个数75), 所以整个海面样本的回波要跨越分辨单元数 N_r 为118个。每一个海面样本的杂波信号都由 N_r 距离门的信号组成, 即总的杂波是一个 $N_t \times N_r$ 的2维复数数组, N_t 为模拟的慢时间序列。基于本文电磁模型与信号模型可获得时变海面宽带回波数据, 首先对脉冲压缩前的宽带杂波做统计分析, 采用K分布对杂波数据进行拟合, 图6为不同距离门内的杂波统计分析结果。

从脉冲压缩前的分布来看, 前端(第10个)与末尾(第100个)分辨单元内的杂波幅度分布范围明显偏小, 结合图3示意以及式(15)可知, 第 k 个距离门的回波 S_k , 其信号为前面 $k-1$ 个距离分辨单元延时回波信号的叠加, 初始与末尾的距离门由于时间延迟, 造成很多来自其他分辨单元的杂波没有落入距

离门内, 其杂波叠加效果并不明显。而位于中间区域的距离门(第60与70个), 绝大部分的分辨单元的杂波都会出现在该距离门内, 即该距离门的杂波来自几乎整个海面样本杂波的叠加。

1维距离像体现杂波的空间分布特征。对获得的宽带杂波进行脉冲压缩, 每一时刻的时变海面杂波经脉冲压缩后获得环境样本的1维距离像, 对按时间序列分布的时变海面1维距离像序列进行统计分析可获得脉冲压缩后每个距离分辨单元的杂波分布特征。图7为第5 s, 5.15 s, 5.3 s杂波的1维距离像, 横坐标为环境在雷达视线上的投影距离, 零点取的是中间距离门的位置。环境样本水平距离为100m, 雷达入射角为60°, 所以理论投影距离为 $100 \times \sin(\pi/3) \approx 86.6$ m, 与图7中的杂波分布长度基本一致。图8为第60个分辨单元内的杂波脉冲压缩前后的分布特征对比。

在图8中脉冲压缩后杂波集中在幅度较小的区域, 即经过脉冲压缩, 单个距离分辨单元内的杂波幅度大大降低, 这对于目标的检测是十分有利的。从而也证明了采用宽带信号体制能够有效地减小目标所在分辨单元的杂波功率, 是一种十分有效的抗杂波方法。

6 结束语

本文对基于电磁散射模型的宽带海杂波建模方法进行了研究。不同于统计模型, 该模型生成的不

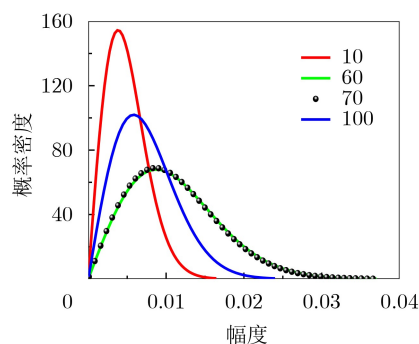


图 6 脉冲压缩前宽带海杂波统计特性

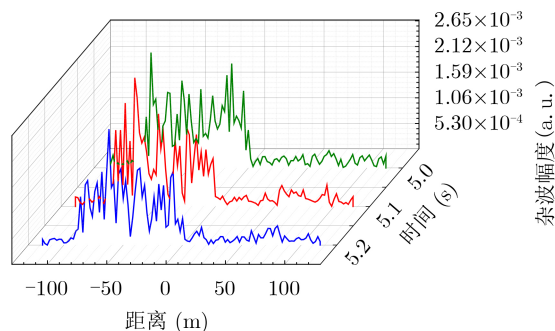


图 7 宽带海杂波不同时刻的1维距离像

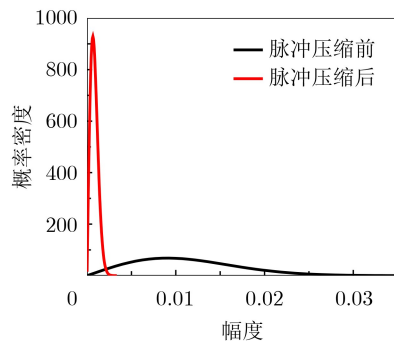


图8 脉冲压缩前后宽带海杂波的统计特性

是具有某种分布特征的随机序列，而是包含明确散射机理和波形调制的电磁信号。仿真过程充分考虑了海面各个区域与雷达波的作用机理，并以数字序列的形式体现在最终的杂波信号数据中。本文对改进双尺度面元模型的加速处理保证了模拟的效率，采用子脉冲信号的形式完成了电磁模型到宽带信号模型的映射。通过仿真分析了不同距离单元内的杂波分布特性，展示了脉冲压缩对杂波的抑制效果。该杂波建模方法具有灵活性和准确性特点，特别是对于统计模型难以表征的具有“极端”散射现象的非均匀海面，该方法原则上都不受限制，所以在下一步工作中，计划对含有舰船尾迹和碎浪的海面杂波信号建模展开研究。

参考文献

- [1] 王勇, 许小剑. 海上舰船目标的宽带雷达散射特征信号仿真[J]. 航空学报, 2009, 30(2): 337–342. doi: [10.3321/j.issn:1000-6893.2009.02.024](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6893.2009.02.024).
WANG Yong and XU Xiaojian. On wideband radar signature simulation of ships over sea surface[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(2): 337–342. doi: [10.3321/j.issn:1000-6893.2009.02.024](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6893.2009.02.024).
- [2] 齐聪慧. 动态海面及其上方目标的电磁散射建模与回波特性分析[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2015.
QI Conghui. Characteristics analyses and electromagnetic modeling of scattering from time-evolving sea surface and target[D]. [Ph. D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [3] 刘万萌, 童创明, 王童, 等. 基于电磁散射模型的宽带雷达海杂波特性分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2017, 18(6): 58–63. doi: [10.3969/j.issn.1009-3516.2017.06.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-3516.2017.06.010).
LIU Wanmeng, TONG Chuangming, WANG Tong, et al. Research on the characteristics of wideband radar sea clutter based on the scattering model[J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2017, 18(6): 58–63. doi: [10.3969/j.issn.1009-3516.2017.06.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-3516.2017.06.010).
- [4] YANG Pengcheng, LYU Xiaode, CHAI Zhihai, et al. Clutter cancellation along the clutter ridge for airborne passive radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(6): 951–955. doi: [10.1109/LGRS.2017.2689076](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2689076).
- [5] WANG Zetao, WANG Yongliang, GAO Fei, et al. Clutter nulling space-time adaptive processing algorithm based on sparse representation for airborne radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(1): 177–184. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0118](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0118).
- [6] ROSENBERG L, WATTS S, and GRECO M S. Modeling the statistics of microwave radar sea clutter[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2019, 34(10): 44–75. doi: [10.1109/MAES.2019.2901562](https://doi.org/10.1109/MAES.2019.2901562).
- [7] ANGELLIAUME S, ROSENBERG L, and RITCHIE M. Modeling the amplitude distribution of radar sea clutter[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 319. doi: [10.3390/rs11030319](https://doi.org/10.3390/rs11030319).
- [8] 张西川, 谢文冲, 张永顺, 等. 任意波形相关性的机载MIMO雷达杂波建模与分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3): 646–651. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00416](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.00416).
ZHANG Xichuan, XIE Wenchong, ZHANG Yongshun, et al. Modeling and analysis of the clutter on airborne MIMO radar with arbitrary waveform correlation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(3): 646–651. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00416](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.00416).
- [9] MCDONALD M and CERUTTI-MAORI D. Multi-phase centre coherent radar sea clutter modelling and simulation[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(9): 1359–1366. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0628](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0628).
- [10] 廖桂生, 许京伟, 李婕, 等. 弹载相控阵雷达系统设计与信号处理问题[J]. 航空兵器, 2017(1): 3–9. doi: [10.19297/j.cnki.41-1228/tj.2017.01.001](https://doi.org/10.19297/j.cnki.41-1228/tj.2017.01.001).
LIAO Guisheng, XU Jingwei, LI Jie, et al. Key Issues on system design and signal processing for missile-borne phased array radar[J]. *Aero Weaponry*, 2017(1): 3–9. doi: [10.19297/j.cnki.41-1228/tj.2017.01.001](https://doi.org/10.19297/j.cnki.41-1228/tj.2017.01.001).
- [11] XIN Zhihui, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei, et al. A deterministic sea-clutter space-time model based on physical sea surface[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(11): 6659–6673. doi: [10.1109/TGRS.2016.2587739](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2587739).
- [12] KARAEV V, TITCHENKO Y, PANFILOVA M, et al. The Doppler spectrum of the microwave radar signal backscattered from the sea surface in terms of the modified Bragg scattering model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(1): 193–202. doi: [10.1109/TGRS.2019.2935343](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2935343).
- [13] WEI Pengbo, ZHANG Min, NIE Ding, et al. Statistical realisation of CWMFSM for scattering simulation of space-time varying sea surface[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(1): 332–345. doi: [10.1080/01431161.2018.1513663](https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1513663).

- [14] YANG Pengju and GUO Lixin. Doppler spectrum of polarimetric scattering field from two-dimensional time-varying nonlinear sea surfaces[J]. *Waves in Random and Complex Media*, 2016, 26(4): 516–534. doi: [10.1080/17455030.2016.1170228](https://doi.org/10.1080/17455030.2016.1170228).
- [15] CHEN Junlong, ZHANG Min, WANG Jiakun, *et al.* Scattering and Doppler analysis for electrically large nonlinear sea surfaces: A field-based semi-deterministic model[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(15): 4443–4458. doi: [10.1080/01431161.2017.1320446](https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1320446).
- [16] SOFIANI R, HEIDAR H, and KAZEROONI M. An efficient raw data simulation algorithm for large complex marine targets and extended sea clutter in spotlight SAR[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2018, 60(5): 1223–1230. doi: [10.1002/mop.31143](https://doi.org/10.1002/mop.31143).
- [17] DELL'AGLIO D A G, DI MARTINO G, IODICE A, *et al.* A unified formulation of SAR raw signals from extended scenes for all acquisition modes with application to simulation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(8): 4956–4967. doi: [10.1109/TGRS.2018.2844094](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2844094).
- [18] WANG Tong and TONG Chuangming. An analytical model of double scattering for SAR imaging of urban structures[J]. *Optik*, 2018, 171: 484–491. doi: [10.1016/j.ijleo.2018.06.084](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.06.084).
- [19] 王童, 童创明, 李西敏, 等. 海洋粗糙面全极化电磁散射特性研究[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(6): 1412–1418. doi: [10.11999/JEIT170924](https://doi.org/10.11999/JEIT170924).
- WANG Tong, TONG Chuangming, LI Ximin, *et al.* Research on the full polarimetric electromagnetic scattering characteristics of ocean rough surface[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(6): 1412–1418. doi: [10.11999/JEIT170924](https://doi.org/10.11999/JEIT170924).
- [20] WANG Tong and TONG Chuangming. An improved facet-based TSM for electromagnetic scattering from ocean surface[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(5): 644–648. doi: [10.1109/LGRS.2018.2810308](https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2810308).
- [21] ELFOUHAILY T, CHAPRON B, KATSAROS K, *et al.* A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 1997, 102(C7): 15781–15796. doi: [10.1029/97JC00467](https://doi.org/10.1029/97JC00467).
- [22] 任新成, 刘鹏, 朱小敏, 等. 土壤表面与置于其上组合目标复合电磁散射特性研究[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(11): 2629–2635. doi: [10.11999/JEIT190645](https://doi.org/10.11999/JEIT190645).
- REN Xincheng, LIU Peng, ZHU Xiaomin, *et al.* Study on the characteristics of composite electromagnetic scattering from soil surface and combinatorial target placed on it[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(11): 2629–2635. doi: [10.11999/JEIT190645](https://doi.org/10.11999/JEIT190645).
- [23] VORONOVICH A G and ZAVOROTNY V U. Theoretical model for scattering of radar signals in K_u - and C-bands from a rough sea surface with breaking waves[J]. *Waves in Random Media*, 2001, 11(3): 247–269. doi: [10.1080/13616670109409784](https://doi.org/10.1080/13616670109409784).
- 王童: 男, 1988年生, 讲师, 研究方向为目标与环境电磁散射特性、雷达回波模拟与成像。
- 童创明: 男, 1964年生, 教授, 主要研究方向为计算电磁学、电磁散射逆散射与目标识别、微波成像等。
- 许光飞: 男, 1985年生, 助理研究员, 研究方向为通信对抗、仿真试验。
- 彭鹏: 男, 1982年生, 讲师, 研究方向为目标特性与雷达信号处理。
- 王宜进: 男, 1994年生, 博士生, 研究方向为目标与环境电磁散射特性。

责任编辑: 陈倩