

一种面向水面纹理的毫米波 LFMCW 雷达成像算法

魏翔飞^{①②③} 种劲松^{*①②} 王小青^④ 李原^{①②} 孟辉^{①②③}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院大学 北京 100190)

^④(中国科学院微电子研究所 北京 100029)

摘要: 利用毫米波线性调频连续波(LFMCW)雷达探测水面时,静止目标的回波以及噪声通常会淹没水面本身的回波信号,导致采用传统成像算法得到的结果中难以看到水面波浪纹理。针对这一问题,该文提出一种面向水面纹理的毫米波 LFMCW 雷达成像算法,该算法在距离向上采用 Dechirp 技术进行距离压缩,在方位向上进行分块处理。方位向分块处理过程中,首先根据静止目标与运动目标回波多普勒频率不同的特性,在频域去除静止目标回波的干扰;然后基于水面电磁散射特性,采用最大似然估计方法估计方位向频谱参数,计算水面回波能量。采用该算法对实测数据进行处理,结果显示该算法能够获得水面纹理信息,成像结果优于传统成像算法。

关键词: 毫米波 LFMCW 雷达; 水面纹理; 最大似然估计

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)05-1030-06

DOI: 10.11999/JEIT160684

Imaging Algorithm of Millimeter-wave LFMCW Radar for Water Surface Texture Detection

WEI Xiangfei^{①②③} CHONG Jinsong^{①②} WANG Xiaoqing^④ LI Yuan^{①②} MENG Hui^{①②③}

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^②(*National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Beijing 100190, China*)

^③(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^④(*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: In the application of millimeter-wave Linear Frequency Modulated Continuous Wave (LFMCW) radar for water surface detection, the echo of water surface itself is always covered by the echo of stationary targets and noises, leading to the result that water surface texture can hardly be seen in the figures obtained by the conventional imaging algorithm. To solve this problem, an imaging algorithm of millimeter-wave LFMCW radar for water surface texture is proposed, the Dechirp technique is adopted to complete the range compression in range direction, and the data is divided into blocks to be dealt with separately in azimuth direction. During the processing in azimuth direction, interference from static targets is removed in frequency domain according to the fact that stationary targets and moving targets have different Doppler frequencies; then, based on the electromagnetic scattering characteristic of water surface, a maximum likelihood estimation method is used to estimate azimuth spectrum parameters to calculate the energy of water surface echo. The proposed algorithm is used to process measured data, and the results show that water surface texture can be obtained, which means that the proposed algorithm is superior to the traditional one.

Key words: Millimeter-wave Linear Frequency Modulated Continuous Wave (LFMCW) radar; Water surface texture; Maximum likelihood estimation

1 引言

毫米波线性调频连续波(Linear Frequency

Modulated Continuous Wave, LFMCW)雷达具有元件简易、距离分辨率高、灵敏度高、峰值功率低的特点^[1],可以应用于机场跑道异物检测^[2-6]以及水面探测等。毫米波 LFMCW 雷达水面探测应用的报道较少,Leonard 等人^[7]将英国 QinetiQ 公司开发的毫米波 LFMCW 雷达用于水面探测。实验结果表明,当 LFMCW 雷达波束视向固定不动时,能够获取水

收稿日期: 2016-06-29; 改回日期: 2016-11-01; 网络出版: 2-16-12-02

*通信作者: 种劲松 iccas_chong@163.com

基金项目: 微波成像技术国家重点实验室基金(CXJJ_15S119)

Foundation Item: The Foundation of National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging (CXJJ_15S119)

面波浪随时间变化的信息；当 LFM CW 雷达以扫描模式工作时，能够探测到水草、小船、浮标等目标。

本文利用中国科学院电子学研究自行研制的毫米波 LFM CW 雷达，开展了水面探测实验。使用传统成像算法能获得水草、小船等目标信息。传统成像算法首先采用 Dechirp 技术进行距离压缩，然后对数据在方位向上分块，接下来对每一块沿方位向进行能量求和。由于传统成像算法没有考虑静止目标回波以及乘性噪声对水面水波的干扰，因此采用传统成像算法处理出的 2 维图像中无法看到水面波浪纹理。而水面风浪等现象可以通过水面纹理表现出来，因此水面纹理也是毫米波 LFM CW 雷达的探测对象。为此，本文提出了一种面向水面纹理的毫米波 LFM CW 雷达成像算法。该算法在方位向处理时，首先采用频域滤波法去除静止目标对水面回波的干扰，然后根据水面电磁散射特性，利用最大似然估计方法，从受到乘性噪声干扰的方位向频谱中估计频谱参数，计算水面回波能量，所获得的 2 维图像中能明显看到水面波浪纹理，成像结果明显优于传统成像算法。

2 面向水面纹理的毫米波 LFM CW 雷达成像算法

本文面向水面纹理提出的毫米波 LFM CW 雷达水面成像流程图如图 1 所示，整个成像过程分为 3 个部分：距离向处理、方位向处理和坐标转换。首先采用 Dechirp 技术^[8]进行距离压缩；其次是方位向处理，从受到静止目标干扰和乘性噪声干扰的方位向频谱中估计出频谱参数，计算水面回波能量；最后是坐标转换，由于毫米波 LFM CW 雷达回波数据以极坐标格式存储，需要通过 2 维插值将极坐标下的图像转换为直角坐标下的图像。

2.1 距离向处理

毫米波 LFM CW 雷达在距离向发射实线性调频信号，记为

$$s_1(t) = \text{rect}(t/T_p) A \sin(\pi K_r t^2 + 2\pi f_c t + \varphi_0) \quad (1)$$

其中， $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq 1/2 \\ 0, & |u| > 1/2 \end{cases}$ ， T_p 为脉冲宽度， A 为信号幅值， K_r 为调频率， f_c 为中心载频， φ_0 为初相位。

假设存在 n 个不同目标，斜距分别为 R_i ($i = 1, 2, \dots, n$)，则这 n 个目标的时延分别为

$$\tau_i = 2R_i/c, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

因此，回波信号可以表示为

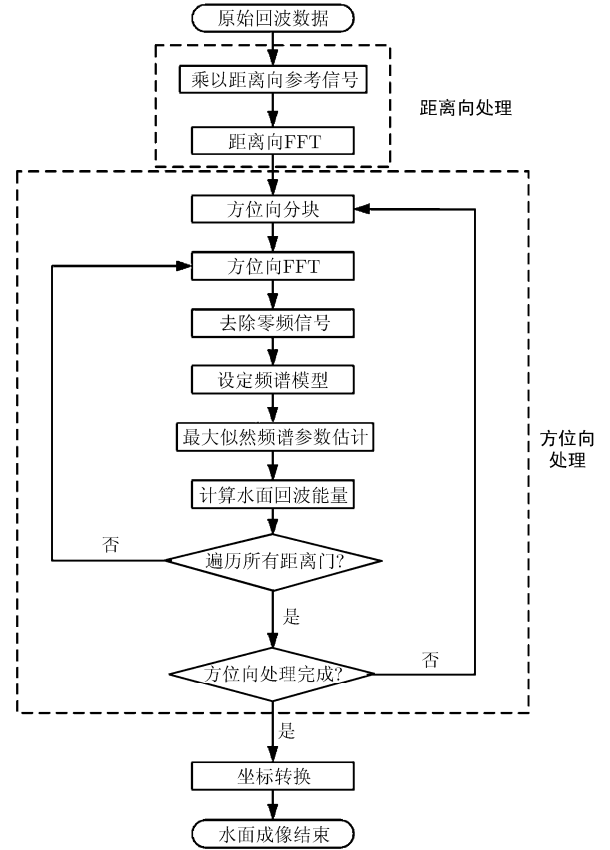


图 1 面向水面纹理的毫米波 LFM CW 雷达成像流程图

$$s_2(t) = \sum_{i=1}^n \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{T_p}\right) B_i \cdot \sin\left[\pi K_r (t - \tau_i)^2 + 2\pi f_c (t - \tau_i) + \varphi_i\right] \quad (3)$$

其中， B_i 表示第 i 个目标回波信号的幅值，由雷达双程天线方向图和目标后向散射特性决定， φ_i 为回波信号初相位。

将发射信号作为参考信号，与回波信号做差频处理，并将式(2)代入得

$$s_3(t) = \sum_{i=1}^n \text{rect}\left(\frac{t - 2R_i/c}{T_p}\right) C_i \cdot \cos\left[\frac{4\pi R_i}{c} \left(K_r t + f_c - \frac{K_r R_i}{c}\right) + \varphi_i - \varphi_0\right] \quad (4)$$

其中， C_i 为输出信号幅度。从式(4)中可以看出，差频输出信号为 n 个单频余弦信号的叠加，信号频率分别为

$$f_i = \frac{2K_r R_i}{c}, \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

对差频输出信号做傅里叶变换，在频域就可以得到不同距离处目标所对应的 sinc 状窄脉冲。

2.2 方位向处理

方位向处理时，首先对经过距离压缩的数据在

方位向分为大小为 M 的块, M 一般为 2 的整数次幂, 并对每一块分别进行处理。设方位向的一个序列为

$$s_a(n), n = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

该序列的傅里叶变换为

$$S_a(k) = f\{s_a(n)\}, k = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

$S_a(k)$ 为方位向频谱, 也称为多普勒谱。由于静止目标回波的多普勒频率为零, 而水面存在一定的运动, 其回波的多普勒频率不为零, 因此去除方位向频谱中零频位置的信号, 就可以去除静止目标的干扰。根据水面的电磁波散射特性, 获得水面回波多普勒谱模型; 基于此模型, 利用最大似然估计得到频谱参数, 从而计算出水面回波能量。循环遍历所有距离门和所有方位块, 就完成了对全部数据的处理。

2.2.1 水面回波多普勒谱模型 水面对电磁波的后向散射可以解释为是由与雷达波长相当的水面波分量与入射电磁波发生谐振而获得的, 这就是所谓的 Bragg 散射, Bragg 散射是水面后向散射的主要机制^[9]。谐振的 Bragg 波分别沿面向雷达和背向雷达的方向传播, 因此典型的水面回波信号多普勒谱中存在两个峰值, 分别称作正 Bragg 峰(positive Bragg peaks)和负 Bragg 峰(negative Bragg peaks)^[10,11]。由于 Bragg 波会受到较大尺度重力波的调制^[12,13], 多普勒谱中双峰位置不是关于零频对称的。

设 Bragg 波的相速度为 c_{BP} , 大尺度重力波的漂流速度为 c_d , 则 Bragg 波的运动速度为

$$c_{B1} = c_{BP} + c_d \quad (8)$$

$$c_{B2} = -c_{BP} + c_d \quad (9)$$

其中, c_{B1} 表示朝向雷达传播的 Bragg 波速度, c_{B2} 表示远离雷达传播的 Bragg 波速度, 这里假设 Bragg 波朝向雷达传播时相速度为正。多普勒频谱中, 两个峰值之间的频率间隔为

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2c_{B1}}{\lambda_0} - \frac{2c_{B2}}{\lambda_0} = \frac{4c_{BP}}{\lambda_0} \quad (10)$$

其中, λ_0 表示雷达波长。

从上面的分析可知, 水面回波的多普勒谱中存在两个峰值, 并且它们之间有固定的频率差。由于毫米波 LFM CW 雷达天线方向图近似为高斯型, 本文用“双高斯”函数近似水面回波的多普勒谱, 其表达式为

$$I_s(x) = ae^{-b(x-d)^2} + ce^{-b(x-d-\Delta n)^2} + I_0 \quad (11)$$

其中, x 表示离散频率点, I_0 表示背景噪声强度, a, c 分别表示两个高斯峰的幅值, b 为高斯峰的尺度, d 和 $d + \Delta n$ 分别表示两个峰值所在的位置。

$$\Delta n = \frac{\Delta f \cdot M}{B_a} = \frac{4M \cdot c_{BP}}{\lambda_0 B_a} \quad (12)$$

其中, B_a 表示方位向带宽。从式(10)可以看出, Δn 为一个与雷达系统参数以及分块大小有关的常数。

2.2.2 最大似然频谱参数估计 水面回波的多普勒谱如式(9)所示, 其中 a, b, c, d 为待估参数。由于受到乘性斑点噪声和系统热噪声的影响^[14], 多普勒谱中任一频率点上的信号强度值服从指数分布^[15]。多视处理之后, 任一频率点上的信号强度值可以用 Gamma 分布描述^[16], 概率密度函数为

$$P(y_i / \theta) = \frac{1}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{I_s(x_i) + I_{n_i}} \right)^L y_i^{L-1} \cdot e^{-\frac{L y_i}{I_s(x_i) + I_{n_i}}} \quad (13)$$

其中, y_i 表示某一频率点的信号强度值, L 为多视处理的视数, $\theta = (a, b, c, d)^T$ 为待估参数向量, $I_s(x_i)$ 为该频率点信号平均强度, I_{n_i} 为系统噪声强度。对式(13)简化:

$$P_i = P(y_i / \theta), I_i = I_s(x_i) + I_{n_i} \quad (14)$$

假设频谱各个频率点之间相互独立, 则频谱采样序列的联合概率密度函数为

$$P = P(\mathbf{y} / \theta) = \prod_{i=1}^n P_i = \left(\frac{1}{\Gamma(L)} \right)^n \prod_{i=1}^n \left(\frac{L}{I_i} \right)^L y_i^{L-1} \cdot e^{-\frac{L y_i}{I_i}} \quad (15)$$

其中, \mathbf{y} 为含噪声的频谱采样序列, n 表示离散频率采样点个数, 采样序列联合概率密度函数的对数似然函数为

$$\ln P = -L \sum_{i=1}^n \left(\ln I_i + \frac{y_i}{I_i} \right) + S(\mathbf{y}) \quad (16)$$

其中,

$$S(\mathbf{y}) = (L-1) \sum_{i=1}^n \ln y_i + n(L \ln L - \ln \Gamma(L)) \quad (17)$$

利用最大似然估计法, 将联合概率密度函数取最大值时的参数作为待估计参数的估计值, 则

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{ml} &= \arg \max_{\theta} P(\mathbf{y} / \theta) = \arg \max_{\theta} P \\ &= \arg \min_{\theta} (-\ln P) \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $\hat{\theta}_{ml}$ 为参数 θ 的最大似然估计值。这是一个无约束的最优化问题, 可以采用牛顿法求解式(18)的最优解。目标函数 $f(\theta) = -\ln P$, 牛顿迭代法的迭代公式为

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \mathbf{G}_k^{-1} \cdot \mathbf{g}_k \quad (19)$$

其中, θ_k 表示第 k 次迭代的结果, θ_{k+1} 表示第 $k+1$ 次迭代的结果, \mathbf{G}_k 表示目标函数在 θ_k 处的 Hesse 矩阵, \mathbf{g}_k 表示目标函数在 θ_k 处的梯度。牛顿迭代法的计算步骤如下:

(1) 选定 θ_0 作为待估计参数的初始值, 并设定终止条件 $\|\mathbf{g}(\theta)\| \leq \varepsilon$, ε 满足条件 $0 \leq \varepsilon \ll 1$;

(2)计算当前点的梯度向量 $g_k = g(\theta_k)$ ，若满足终止条件，则停止迭代，将当前点作为估计点，否则继续；

(3)计算当前点的 Hesse 矩阵 G_k ，利用迭代公式 $\theta_{k+1} = \theta_k - G_k^{-1} \cdot g_k$ 计算下一个估计点；

(4)回到步骤(2)，继续执行。

通过牛顿迭代法，可以得到参数 θ 的最优估计值。前面的分析表明，该估计值为最大似然估计值。利用参数 θ 的估计值，可以计算出水面 Bragg 波回波能量为 $(a + c) / \sqrt{b}$ 。

3 毫米波 LFM CW 雷达水面探测实验及其数据处理

2015 年 9 月 10 日在北京怀柔水库，利用中国科学院电子学研究所自行研制的毫米波 LFM CW 雷达开展了水面探测实验，获取了实验数据。实验目的是探测水面纹理现象。雷达系统参数如表 1 所示，图 2 为实验场地示意图、实验雷达以及实验中的小船。该示意图来自于百度地图，成像日期为 2015 年 6 月 10 日。实验当天有小雨，并且伴有西南阵风，风速为 3 m/s 左右。

图 3 为采用传统成像算法得到的结果，图 4 为采用本文成像算法处理得到的结果，图 5(a)和图 5(b)分别为图 4 左边方框和右边方框的放大图。为了便于显示，图中将回波的强度值量化到 0~65535 之间。图 3 中能够看到水草以及实验小船，但是由于传统算法没有考虑静止目标和噪声对水面本身回波的影响，水面回波被静止目标回波和噪声所淹没，导致图 3 中无法看到水面波浪纹理。从图 4 中不仅能看到小船、水草等目标，还能看到水面的波浪纹理。图 5(a)和图 5(b)中也可以看到明显的波浪纹理。在实验进行的过程中，由于受到雨水和水面风的影响，水面不均匀，不同位置处水面的粗糙度并不相同。在粗糙度相对较小的地方，水面后向散射较弱；而在粗糙度相对较大的地方，水面后向散射较强。因此不同位置处雷达回波的强度不同，雷达回波能量是不均匀的，这种不均匀形成了图 5 中所看到的水面波浪纹理。但是同时应该注意到，本文算法中存在多视处理，图 4 中小船的形状发生了变化。因此，若观测对象为小船等目标时，可以采用传统的成像算法。

图 6(a)和图 6(b)分别为图 4 左边方框和右边方

表 1 毫米波 LFM CW 雷达系统参数

波长(m)	脉冲宽度(ms)	带宽(GHz)	调频率(GHz/s)	PRF(Hz)	采样率(MHz)	旋转角(°)	探测范围(m)	入射角范围(°)	极化方式
0.0087	0.5	1.2	2400	2000	50	80	10~500	75~85	HH



图 2 实验场地、实验雷达和实验区域中的小船

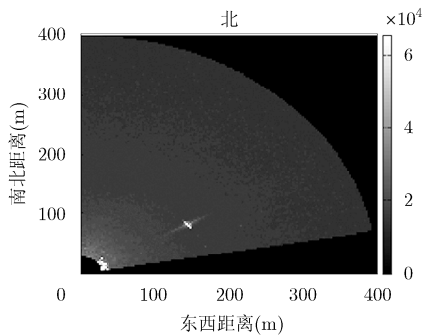


图 3 传统算法成像结果

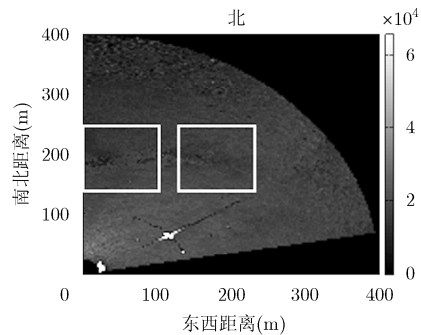


图 4 本文算法成像结果

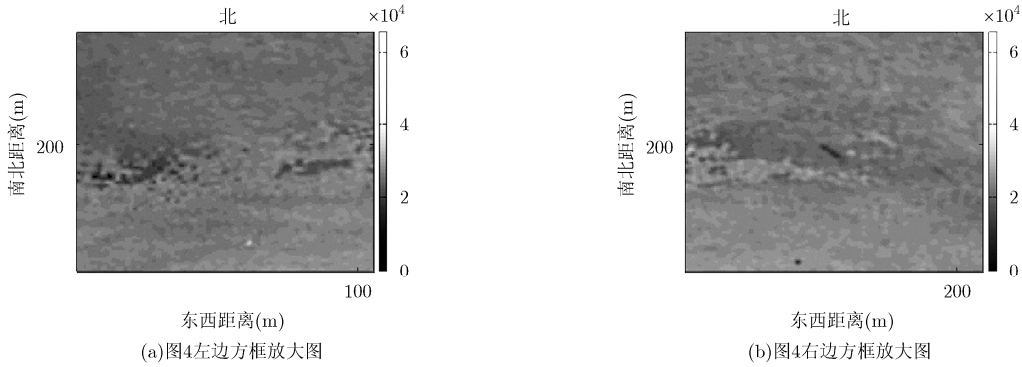


图 5 图 4 方框水面纹理放大图

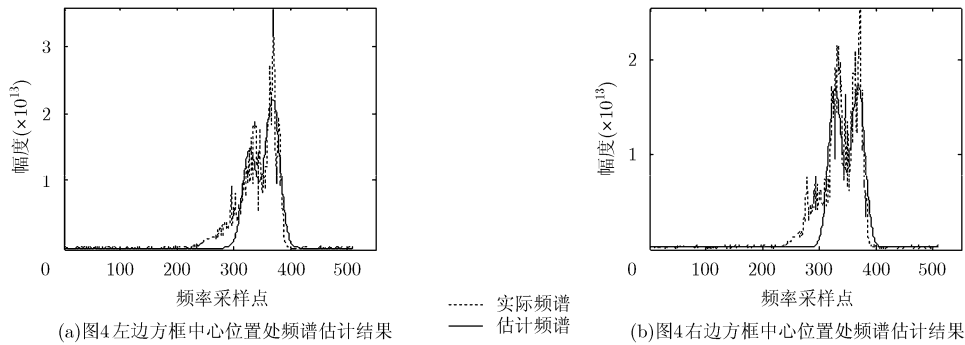


图 6 图 4 左边方框和右边方框中心位置处的频谱估计结果

框中心位置处频谱估计的结果，从中可以看出，本文最大似然估计方法能准确估计出“双峰”的幅度、尺度与位置，估计的频谱与实际频谱能较好吻合。

为了定量分析估计的频谱与实际频谱的吻合度，本文以频谱能量的误差比例作为分析的标准。以 $S_a(k)$ 表示实际的频谱，以 $S_e(k)$ 表示估计的频谱，则频谱能量的误差比例 η 可以表示为

$$\eta = \frac{\left| \sum_k |S_e(k)|^2 - \sum_k |S_a(k)|^2 \right|}{\sum_k |S_a(k)|^2} = \left| \frac{\sum_k |S_e(k)|^2}{\sum_k |S_a(k)|^2} - 1 \right| \quad (20)$$

由于回波能量主要集中在频谱的 Bragg 波谱段附近，Bragg 波谱段之外的频谱能量为噪声能量，因此计算谱能量时只需要考虑在 Bragg 波谱段附近的频谱能量。采用式(20)的计算方法，对图 6(a)和图 6(b)分别计算误差比例，其中 k 的取值为 $300 \leq k \leq 400$ ，谱能量的误差比例分别为 $\eta_a = 0.09$ ， $\eta_b = 0.07$ 。从上面的结果中可以看出，估计的频谱与实际频谱之间的频谱能量误差比例在 $\pm 10\%$ 之内，说明估计频谱与实际频谱的吻合度较好，这也验证了本文算法的有效性。

4 结束语

本文提出了一种面向水面纹理的毫米波

LFMCW 雷达成像算法，解决了传统成像算法无法获取水面纹理这一问题。该算法在处理方位向数据时，首先去除零频位置信号，然后利用水面电磁散射特性，采用最大似然估计方法，从受到乘性噪声干扰的方位向频谱中估计频谱参数，计算出水面回波能量。与传统成像算法相比，该算法不仅去除了静止目标的干扰，同时减少了乘性噪声干扰。采用该成像算法处理毫米波 LFMCW 雷达实验数据，得到的图像中能看到水面波浪纹理，成像结果明显优于传统成像算法。由于本文算法中存在多视处理，会造成目标变形。因此，若观测对象为小船等水面目标时，任可采用传统算法；而观测对象为水面纹理时，需要采用本文成像算法。

毫米波 LFMCW 雷达具有很高的距离分辨率，在海洋应用中，能够检测到水面扰动信息；其元件简易、灵敏度高、峰值功率低，因此毫米波 LFMCW 雷达能够以较小的花费，获取较高分辨率的海面纹理影响。理论上，本文算法不受海面风速、海面状况等参数的影响，因此基于本文的成像算法可以预见，毫米波 LFMCW 雷达在获取海面纹理影像上具有较大的应用潜力。

参考文献

[1] MEHDI G and MIAO Jungang. Millimeter wave FMCW

- radar for foreign object debris (FOD) detection at airport runways[C]. International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST), Islamabad, Pakistan, 2012: 407-412. doi: 10.1109/IBCAST.2012.6177589.
- [2] FERRI M, GIUNTA G, BANELLI A, *et al.* Millimeter wave radar applications to airport surface movement control and foreign object detection[C]. European Radar Conference, Rome, Italy, 2009: 437-440.
- [3] MAZOUNI K, KOHMURA A, FUTATSUMORI S, *et al.* 77GHz FM-CW radar for FODs detection [C]. European Radar Conference, Paris, France, 2010: 451-454.
- [4] NSENGIYUMVA F, PICHOT C, ALIFERIS I, *et al.* Millimeter-wave imaging of foreign object debris (FOD) based on two-dimensional approach[C]. IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), Chiang Mai, Thailand, 2015. doi: 10.1109/CAMA.2015.7428122.
- [5] ZHONG Qi, ZHANG Zhongjin, YAN Danqing, *et al.* Airport runway FOD detection based on LFM CW radar using interpolated FFT and CLEAN[C]. IEEE 12th International Conference on Computer and Information Technology, Chengdu, China, 2012: 747-750. doi: 10.1109/CIT.2012.160.
- [6] FEIL P, MENZEL W, NGUYEN T P, *et al.* Foreign objects debris detection (FOD) on airport runways using a broadband 78 GHz sensor[C]. European Radar Conference, Amsterdam, Netherlands, 2008: 451-454. doi: 10.1109/EUMC.2008.4751779.
- [7] LEONARD T, LAMONT S T, HODGES R, *et al.* 94 GHz TARSIER radar measurements of wind waves and small targets[C]. European Radar Conference, Manchester, UK, 2011: 73-76.
- [8] CAPUTI W J. Stretch: A time-transformation technique [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1971, 7(2): 269-278. doi: 10.1109/TAES.1971.310366.
- [9] CROMBIE D D. Doppler spectrum of sea echo at 13.56Mc/s [J]. *Nature*, 1955, 175(4459): 681-682. doi: 10.1049/cp.2012.1727.
- [10] HUANG Weimin and GILL E. Measuring surface wind direction by mono-static HF Ground-Wave radar at the eastern China sea[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(4): 1032-1037. doi: 10.1109/JOE.2004.834175.
- [11] HUANG Weimin and GILL E. HF radar wave and wind measurement over the eastern China sea[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(9): 1950-1955. doi: 10.1109/TGRS.2002.803718.
- [12] BRUNING C, ALPER W R, and SCHROTER J G. On the focusing issue of synthetic aperture radar imaging of ocean waves[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29(1): 120-128. doi: 10.1109/36.101378.
- [13] OUCHI K. Synthetic aperture radar imagery of range traveling ocean waves[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(1): 30-37. doi: 10.1109/36.2997.
- [14] GOODMAN J W. Statistical Properties of Laser Speckle Patterns[M]. Laser Speckle and Related Phenomena, New York, USA, Springer, 1975: 9-75.
- [15] OLIVER C and QUEGAN S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. Raleigh, NC, SciTech Publishing, USA, 2004: 49-100.
- [16] CHITROUB S, HOUACINE A, and SANSAL B. Statistical characterisation and modelling of SAR images[J]. *Signal Processing*, 2002, 82(1): 69-92.
- 魏翔飞：男，1991年生，博士生，研究方向为 SAR 海洋成像。
- 种劲松：女，1969年生，研究员，博士生导师，研究方向为海洋微波遥感。
- 王小青：男，1978年生，副研究员，研究方向为 SAR 海洋遥感应用与机理。
- 李原：男，1987年生，高级工程师，研究方向为雷达信号处理。
- 孟辉：男，1989年生，博士生，研究方向为 SAR 海洋成像。