

文章编号:1671-8860(2013)09-1048-04

文献标志码:A

# 微波雷达海洋回波多普勒频谱的数值仿真

陈泽宗<sup>1</sup> 金 燕<sup>1</sup> 陈 曜<sup>1</sup> 范林刚<sup>1</sup>

(1 武汉大学电子信息学院,武汉市珞珈山,430072)

**摘要:**研究了微波与海面相互作用的散射机理,在Plant等人研究成果的基础上对多普勒频谱仿真模型进行改进和完善。根据Bragg散射原理、复合表面理论和线性波理论,引入不同极化机制下的NRCS,给出多普勒频谱的谱型、幅度和时域变化特征,比较分析了不同海况下的仿真结果。

**关键词:**微波测浪雷达;多普勒频谱;数值仿真

**中图法分类号:**TP751; TN95; P71

雷达天线发射的电磁波与动态的海洋表面相互作用,其幅度和相位受到调制并且散射回来。由于经过调制的回波携带了海洋表面的浪和流等丰富的基本特性,通过复杂的信号处理和数据分析,可以从回波信号中提取有用的海洋信息。这种利用电磁波探测海洋表面特性的遥感方式已成为海洋环境监测与研究的重要手段,日益受到人们的重视。与传统的直接测量方法(如浮标)相比,雷达遥感具有探测范围广阔,测量数据全面,受气候、时间、地形因素影响小等优点。相比于高频地波雷达<sup>[1]</sup>,微波雷达系统受到外部环境干扰很少,分辨率高,天线系统更加简洁轻巧,便于实现便携式测量<sup>[2]</sup>。

海杂波模型对微波测浪雷达的性能估计、波形设计和数据处理具有重要的意义。大量文献研究了海杂波的幅度特征,提出了适用于高分辨率雷达系统的幅度概率密度分布函数(PDF)及相应的模拟仿真方法,如韦布尔分布、对数正态分布<sup>[3]</sup>。文献[4]研究了影响多普勒谱峰频移的各速度分量,并给出了定量表达式;文献[5]根据Bragg散射机理,由海浪谱仿真得到多普勒频谱,但仅考虑了谱形和频移特征,忽略了频谱幅度及其在不同极化方式下的差异;文献[6]分析了多普勒频谱的谱形特征,提出了相应的轮廓函数,但是实用性不强;Walker<sup>[7]</sup>基于实验数据在多普勒频谱中引入非Bragg散射机制,将各分量假设为不

同的高斯函数,但这仅仅是对数据的拟合分析。综上所述,海杂波的多普勒频谱建模尚待发展和完善。

## 1 基本原理

实验表明,在中等入射角(约20°~70°)情况下,海面散射以Bragg共振散射为主<sup>[8]</sup>。当电磁波的路程差等于Bragg波半波长的整数倍时,就会发生Bragg共振。产生Bragg共振的海面波动的Bragg波波长与电磁波波长满足以下关系:

$$\lambda_B = n \frac{\lambda_0 \sin \varphi}{2 \cos \theta} \quad (1)$$

式中,  $\lambda_B$  为 Bragg 波波长;  $\lambda_0$  为电磁波波长;  $n$  表示产生的 Bragg 散射的阶数, 其中一阶 Bragg 散射的回波最强;  $\varphi$  表示浪向与雷达波束所成的方位夹角,  $\theta$  是电磁波的掠射角。微波雷达发射的电磁波对应于海面上波长为几厘米到几十厘米的毛细波。

三尺度模型<sup>[8]</sup>将海浪分为以下3类:①由局部风压产生的小尺度波(cm级),这类波作为独立的散射体产生Bragg散射;②中尺度波,其波长比Bragg波长略长但比雷达的距离分辨率短。中尺度波调制小尺度波,从而在多普勒谱中改变Bragg峰频率,使多普勒谱展宽;③空间可分辨的长重力波,波长大于距离分辨率,并对中小规模

收稿日期:2013-04-15。

项目来源:国家海洋公益性行业科研专项重大资助项目(201205032);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012212020203)。

波进行调制,在多普勒频谱中表现为对频谱的整体搬移。海洋研究关心的往往是这些长重力波。由于阴影调制、倾斜调制、流体动力调制、轨道调制等作用,可以通过一系列的数据处理从短波散射回波中提取出关于长波的有用信息。

微波回波的多普勒频移给出了在照度区范围内沿天线探测方向的平均速度分量<sup>[9]</sup>。称该速度分量为视向速度:

$$v(t) = \frac{f_D \lambda_0}{2} = u \cos \theta + w \sin \theta \quad (2)$$

式中,  $u$  和  $w$  分别是水平和垂直方向的散射体速度。如果平均流速很小,  $u$  和  $w$  主要分量是长波的轨道速度, 其次是散射体本征速度和海面风漂流的速度。由于照度区的长度远小于待研究的长波, 短时间内轨道速度可以视为稳定不变的。因此, 对于一个充分小的单频浅水波, 有:

$$u = U_0 \cos \Omega t \cos \varphi + V_c + V_s \quad (3)$$

$$w = U_0 \sin \Omega t \tanh Kd \left( 1 - \frac{V_c + V_s}{V_\phi} \right) \quad (4)$$

式中,  $U_0 = \Omega A \coth Kd$ , 是与海浪幅度相关的轨道速度;  $\varphi$  表示雷达波束与浪向之间的夹角;  $K$ 、 $\Omega$ 、 $V_\phi$  分别表示长波的波数、角频率和相速度;  $V_c$  表示表面流速;  $V_s$  表示散射体本征速度。

将式(3)和式(4)代入式(2), 可以推导出调制转移函数的表达式:

$$G_{VV}(\omega, \theta, \varphi) = E(\omega) \cdot F(\omega, \theta, \varphi) \quad (5)$$

式中,  $G_{VV}(\omega, \theta, \varphi)$  为径向速度自相关谱;  $E(\omega)$  为无向海浪谱;  $\omega$  表示海浪角频率;  $F(\omega, \theta, \varphi)$  表示速度谱估计函数。

## 2 仿真模型

### 2.1 多普勒频谱形状建模

当微波照射到海面, 与相应频率的小尺度波作用发生 Bragg 散射。由于海流、长重力波、中尺度波等存在视向的速度分量, 使得回波多普勒频谱发生频移、展宽等效应。在合适的采样时间内, 海流速度可以认为是常量, 长重力波的速度近似均匀变化, 而中尺度波的速度  $V_M$  假设为服从正态分布的随机变量, 均值为零, 方差由速度自相关谱  $G_{VV}(\omega, \theta, \varphi)$  给出<sup>[5]</sup>。Bragg 峰角频率为:

$$\begin{cases} \omega_A = \omega_B + 2k_0[V_G(t) + a_G t + V_c + V_M] \\ \omega_R = \omega_A - 2\omega_B \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\omega_A$ 、 $\omega_R$  分别为前进和后退的 Bragg 波; Bragg 角频率  $\omega_B = \sqrt{gk_B + Tk_B^3} = 2\pi f_B$ ;  $T = 74 \text{ cm}^3/\text{s}^2$  表示表面张力与水密度之比;  $k_0$  表示电

磁波波数;  $V_G$ 、 $a_G$  分别为长重力波的初始速度和加速度。

### 2.2 多普勒频谱幅度建模

根据 Bragg 散射理论, 海面散射元的 NRCS 与 Bragg 共振波的浪高谱密度成比例<sup>[10]</sup>:

$$\sigma_0 = T(k_0, \theta) E(f_B) \quad (7)$$

式中, 比例因子  $T$  与雷达极化方式以及介电常数  $\epsilon$  有关,  $\epsilon$  是一个关于电磁波频率、海水温度、海水含盐量的复函数<sup>[11]</sup>。对于微波电磁散射, 水平极化方式下  $T$  近似为:  $T_{HH} = 16\pi k_0^4 \cos^4 \theta$ ; 垂直极化方式下近似为:

$$T_{VV} = 16\pi k_0^4 \cos^4 \theta \left| \frac{\epsilon^2 (1 + \sin^2 \theta)}{(\epsilon \cos \theta + \sqrt{\epsilon})^2} \right|^2$$

多普勒频谱正负一阶峰的幅值比与方位夹角  $\varphi$  有关<sup>[6]</sup>, 谱峰幅值为:

$$\begin{cases} a_A(\varphi) = \sigma_0 (0.4 \cos \varphi + \sqrt{0.36 - 0.16 \sin^2 \varphi}) \\ a_R(\varphi) = a_A(\pi - \varphi) \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\varphi$  表示海浪波向与雷达波束所成的方位夹角;  $a_A$ 、 $a_R$  分别为前进和后退的 Bragg 波的峰值幅度。

## 3 仿真方法及结果分析

### 3.1 仿真方法

- 1) 利用现有海浪谱模型可以得到无向海浪谱  $E(\omega)$ 。
- 2) 通过调制转移函数得到速度自相关谱  $G_{VV}(\omega)$ , 并由该谱估算相关速度分量。
- 3) 按照谱形模型和幅度模型得到若干组幅度、频移值, 代入转换函数。

$$f(\Delta t) = a_A \exp(i\omega_A \Delta t) + a_R \exp[i\omega_R \Delta t] + N_0 \quad (9)$$

式中,  $N_0$  表示加性噪声。

- 4) 对每一组转换函数作 FFT 变换, 得到  $F_i(\omega)$ ; 于是多普勒频谱为:

$$P(\omega) = \sum_{i=1}^N F_i(\omega) \quad (10)$$

式中,  $N$  表示用于估计一个多普勒频谱所对应的转换函数个数, 与每组数据中尺度波的速度  $V_M$  个数相等。

### 3.2 仿真结果

此次仿真采用工作频率 3 GHz, 掠射角 30°, 并假设探测海域属于深水区, 海浪谱采用 PM 谱, 风速统一采用海面以上 10 m 高处的值。在计算海水的相对介电常数时, 统一假设海水温度为

25 °C, 海水含盐量 2%。该雷达系统连续探测某一照度区 3 min, 解出距离元后得到每个距离元的数据, 每 0.5 s 的数据作 FFT 变换得到一个多普勒频谱。

采用上述仿真方法, 得到如图 1(a)所示的时间-多普勒频谱。其中, 海况参数为: 无海流, 方位夹角 60°, 风速 10 m/s; 信噪比设为 30 dB; 采用 VV 极化方式。随着时间的变化, 多普勒中心频移围绕零频位置上下波动, 体现了长重力波对小尺度波的速度调制作用; 此外, 每个多普勒频谱在正负 Bragg 峰的左右两侧均有展宽效果, 体现了中尺度波的作用。当其他条件不变, 海流为 0.5 m/s(对应多普勒频率 10 Hz)时, 仿真得到海杂波的时间-多普勒频谱如图 1(b)所示。此时, 中心频移展现出整体搬移效果, 围绕 10 Hz 位置波动。这是由于海流作用于长重力波和中尺度波, 增加了多普勒频谱的频偏。

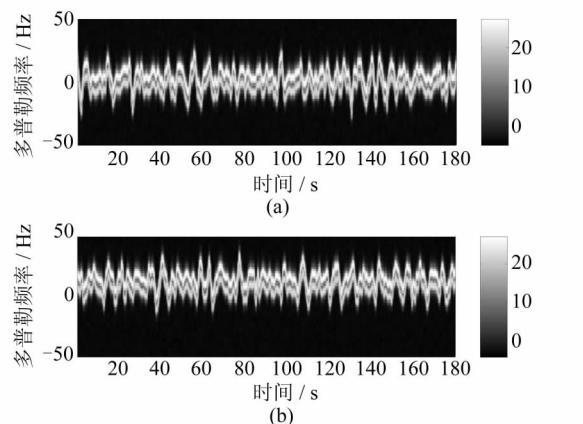


图 1 时间-多普勒频谱

Fig. 1 Time-Doppler Spectra

如图 2 所示, 取出图 1(a)中的一个多普勒频谱, 与同样仿真条件下得到的 HH 极化的多普勒频谱进行比较。VV 极化条件下得到的多普勒频谱幅度远远大于 HH 极化下的值, 这与许多实验观测结果相符<sup>[3]</sup>, 体现了微波海洋遥感中多普勒频谱的固有特征。但对于产生这一现象的作用机理, 目前尚无完整的研究结论, 有待进一步探索。

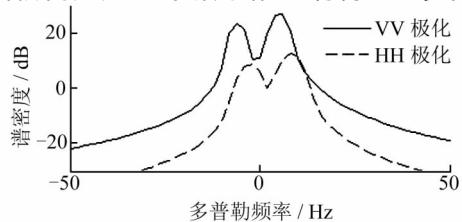


图 2 不同极化方式下的多普勒频谱

Fig. 2 Doppler Spectra of Different Polarization Types

图 3 所示是 4 个不同方位角下的多普勒频谱。其工作参数为: 工作频率 3GHz, 掠射角 30°, VV 极化; 其海况参数为: 海流速度 0 m/s, 风速 10 m/s, 方位夹角分别为 30°、60°、90°、120°。多普勒频谱双峰的幅值大小和方位夹角有关。当海浪向着雷达(方位夹角小大于 90°)时, 正的 Bragg 峰大于负的 Bragg 峰; 当海浪远离雷达(方位夹角大于 90°)时, 负的 Bragg 峰大于正的 Bragg 峰; 当海浪方向与雷达天线波束的方向垂直(方位夹角等于 90°)时, 正负 Bragg 峰相等。夹角越偏离 90°, 正负 Bragg 峰的幅值相差越大。图 3 的多普勒频谱很好地反映了这一规律。

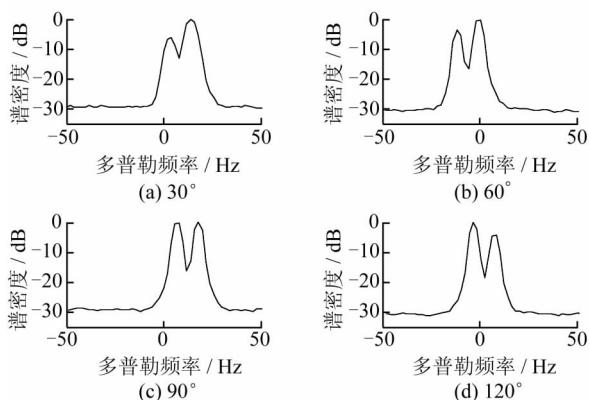


图 3 不同方位夹角下的多普勒频谱

Fig. 3 Doppler Spectra of Different Azimuths

## 4 结语

本文基于微波雷达海洋遥感的基础理论, 提出了一种改进的多普勒频谱仿真方法, 实现了多种海况下窄波束的微波雷达海洋回波谱的仿真。由该数值仿真模型所得的海洋回波多普勒频谱基本能够反映海况的真实变化, 符合海洋遥感理论的一般规律。

但是实际的海面状况要复杂得多, 它不仅与风速、风时和风区等要素有关, 还与海底地形、海水深度、海面温度、大气压、海水成分等各种地物、气象因子紧密相关。因而本文所采用的仿真模型仅仅是一种对实际海况的简化和近似, 实际探测中可能出现的破碎效应、阴影遮挡效应等重要因素还未考虑进去, 有待进一步的研究和改善。

总体来说, 该模型真实地反映了微波雷达回波多普勒频谱的客观规律, 对该仿真数据反演得到了高精度的海浪谱、有效浪高和平均海浪周期。

## 参 考 文 献

- [1] Chen Zezong, Zhao Chen, Jiang Yanni, et al. Wave

- Measurements with Multi-frequency HF Radar in the East China Sea[J]. *J of Electromagn Waves and Appl*, 2011, 25(7): 1 031-1 043
- [2] Egset C N. Sea Surface Waves and Currents from C-band Microwave Radar[J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2006, doi: 10.1109/OCEANS.2006.306905
- [3] Ward K D, Tough R J A, Watts S. Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance[M]. Stevenage: Institution of Engineering and Technology, 2006: 19-32
- [4] Trizna D B. A Model for Doppler Peak Spectral Shift for Low Grazing Angle Sea Scatter[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1985, 4(10): 368-375
- [5] Plant W J. Evidence of Bragg Scattering in Microwave Doppler Spectra of Sea Return[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95 (C9): 16 299-16 310
- [6] Lee P H Y. Power Spectral Lineshapes of Microwave Radiation Backscattered from Sea Surfaces at Small Grazing Angles[J]. *IEEE Proc Radar Sonar Navig*, 1995, 142(5): 252-258
- [7] Walker D. Experimentally Motivated Model for Low Grazing Angle Radar Doppler Spectra of the Sea Surface[J]. *IEE Proc Radar Sonar Navig*, 2000, 147(3): 114-120
- [8] 范开国. 基于海面微波成像仿真 M4S 软件的 SAR 浅海地形遥感探测[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009
- [9] Poulter E M. S-band FMCW Radar Measurements of Ocean Surface Dynamics[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, 12: 1 271-1 286
- [10] Roland Romeiser. A Three-scale Composite Surface Model for the Ocean Wave-radar Modulation Transfer Function[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C5): 9 785-9 801
- [11] 焦培南. 雷达环境与电波传播特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 35-39

第一作者简介: 陈泽宗, 教授, 博士生导师, 主要从事无线电海洋遥感、软件无线电技术研究。  
E-mail: chenzz@whu.edu.cn

## Numerical Simulation of Doppler Spectrum of Sea Echo for Microwave Radar

CHEN Zezong<sup>1</sup> JIN Yan<sup>1</sup> CHEN Xi<sup>1</sup> FAN Lingang<sup>1</sup>

(1 School of Electronic Information, Wuhan University, Luojiashan, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** An improved numerical simulation method of Doppler Spectrum of sea echo for ground-based microwave wave radar is presented based on a study of scattering mechanism of microwave with ocean surface and some research results by W. J. Plant et al. According to the theories of Bragg scattering, composite surface, linear wave, and the expressions for NRCS of different polarization types, the characteristics of Doppler spectrum is displayed in shape, amplitude and time domain, and Doppler spectra of different ocean conditions are compared and qualitatively analyzed. Accordingly, it can be concluded that the simulation results reflect actual ocean environment and accord with objective law, which provides significant theoretical model for oceanographic observation by microwave wave radar and information extraction of sea state, especially parameters of wind, wave and current.

**Key words:** microwave wave radar; doppler spectrum; numerical simulation

**About the first author:** CHEN Zezong, professor, Ph. D supervisor. His interesting include ocean remote sensing by radio and software radio technique.

E-mail: chenzz@whu.edu.cn