

覆盖泡沫动态海面散射回波多普勒谱频移及展宽特征

刘伟^{1*}, 张颖¹, 李可可¹, 刘广君²

1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

2. 航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009

摘要: 为了研究高海情下动态海面的电磁散射, 需将泡沫的电磁散射效应引入到海面电磁散射计算中。基于小斜率近似方法和多普勒谱物理机理, 分别采用等效介电常数模型、矢量辐射传输理论模型对比分析了中低频段和高频段风驱粗糙海面覆盖泡沫层的泡沫-海面复合模型的多普勒谱特性, 讨论了风速、入射波频率等因素对多普勒频移及展宽的影响。结果表明, 泡沫层的动态影响是不可忽视的, 从而也弥补了小斜率近似方法在某些场景中的局限性。

关键词: 电磁散射; 海面模型; 多普勒谱; 小斜率近似; 等效介电常数模型; 矢量辐射传输理论

中图分类号: TN011 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.08.070

目前, 以海洋为背景进行目标与环境复合电磁散射特性的研究显得极其重要。稳态海面可以定性地看作长尺度、周期性的重力波上叠加着毛细波。然而, 实际海面往往难以处于稳定状态, 这是因为在广阔海域上, 海面上方的长波波浪间会进行大量而频繁的能量转换。当海面上方风速较大、波峰达到接近 120° 的楔形, 波峰向前溢出并在波前发生破碎, 从而形成白冠泡沫。泡沫与海面上方目标的电磁散射回波比较类似, 会使得海面检测雷达对海上实际目标的检测与跟踪性能产生较大影响, 增大虚警概率。

Dropleman 等将海面上产生的泡沫用分层海面来近似计算, 即将海面看成是一层或多层的介质来进行求解。Stogryn 利用最小二乘法拟合了试验数据, 推导出泡沫层微波辐射率与微波频率和入射角间的关系表达式。梁玉等^[1]通过 Mie 理论求解出单个粒子的散射结果, 继而利用双尺度方法通过边界条件计算了含泡沫海面的后向和双站散射特性。元晓^[2]针对泡沫-海面复合模型, 采用矢量辐射传输理论 (VRT)、Mie 理论求解了覆盖泡沫海面的激光散射特性。然而, 先前的研究仅仅讨论了覆盖泡沫静态海面的电磁散射特性, 尚未对覆盖泡沫动态海面的电磁散射特性进行

详细分析。海面回波的多普勒谱具有多普勒频移及展宽特征, 反映了海面本身的运动特性。因此, 首先介绍 VRT^[3] 和 Maxwell-Garnett 混合介质^[4] 两种修正模型, 然后采用混合介质模型求解了低频段、小入射角情况下覆盖泡沫动态海面的多普勒特性, 采用 VRT 模型求解了高频段、大入射角情况下覆盖泡沫动态海面的多普勒特性, 并与单纯海面结果进行了对比。

1 两种修正模型

1.1 矢量辐射传输理论修正模型

考虑图 1 所示含泡沫海面模型, 一层离散散射粒子的 VRT 方程为:

$$\begin{aligned} \cos \theta_s \frac{d}{dz} I(\theta_s, \varphi_s, z) = & -\mathbf{k}_e(\theta_s, \varphi_s) \cdot I(\theta_s, \varphi_s, z) + \\ & \int_0^{\pi/2} d\theta_i \sin \theta_i \int_0^{2\pi} d\varphi_i [\mathbf{P}(\theta_s, \varphi_s, \theta_i, \varphi_i) \cdot \\ & I(\theta_i, \varphi_i, z) + \mathbf{P}(\theta_s, \varphi_s, \pi - \theta_i, \varphi_i) \cdot \\ & \bar{I}(\pi - \theta_s - \theta_i, \varphi_i, z)] \end{aligned} \quad (1)$$

收稿日期: 2018-04-04; 退修日期: 2018-04-25; 录用日期: 2018-07-05

基金项目: 航空科学基金 (20150181003); 国家自然科学基金 (41406201)

* 通信作者. Tel.: 13619227300 E-mail: liuwei@mail.xidian.edu.cn

引用格式: Liu Wei, Zhang Ying, Li Keke, et al. Doppler spectral frequency shift and widening characteristics of scattered echoes from dynamic foam-sea surface[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (08): 70-74. 刘伟, 张颖, 李可可, 等. 覆盖泡沫动态海面散射回波多普勒谱频移及展宽特征[J]. 航空科学技术, 2018, 29 (08): 70-74.

$$\begin{aligned}
-\cos\theta_s \frac{d}{dz} I(\pi-\theta_s, \varphi_s, z) &= -\mathbf{k}_e(\theta_s, \varphi_s) \cdot \\
I(\pi-\theta_s, \varphi_s, z) &+ \int_0^{\pi/2} d\theta_i \sin\theta_i \int_0^{2\pi} d\varphi_i \\
[\mathbf{P}(\pi-\theta_s, \varphi_s, \theta_i, \varphi_i) \cdot I(\theta_i, \varphi_i, z) &+ \\
\mathbf{P}(\pi-\theta_s, \varphi_s, \pi-\theta_i, \varphi_i) \cdot I(\pi-\theta_i, \varphi_i, z)] &
\end{aligned} \quad (2)$$

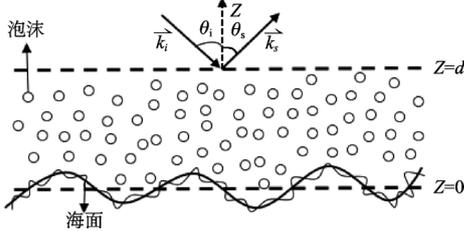


图1 含泡沫海面散射模型图

Fig. 1 Foam-sea surface scattering model

式中： \mathbf{k}_e 为消光矩阵，表示单位体积中强度的衰减， \mathbf{P} 为相矩阵，代表粒子之间多次散射的耦合关系。Stokes 矢量分成向上行 $I(\theta_s, \varphi_s, z)$ 和向下行的 $I(\pi-\theta_s, \varphi_s, z)$ ， $0 \leq \theta_s \leq \pi/2$ ，边界条件为：

$$\begin{cases} I(\pi-\theta_s, \varphi_s, z=d) = I_0 \delta(\cos\theta_s - \cos\theta_i) \delta(\varphi_s - \varphi_i) \cdot T_{01}(\theta_i) + \\ R_{10}(\theta_s) \cdot I(\theta_s, \varphi_s, z=d) \\ I(\theta_s, \varphi_s, z=0) = R_{12}(\theta_s) \cdot I(\pi-\theta_s, \varphi_s, z=0) + T_{12}(\theta_s) \cdot CT_2 \end{cases} \quad (3)$$

可得含泡沫海面的后向散射系数为：

$$\sigma_{pq} = 4\pi \cos\theta_i \frac{I_{sp}(\theta_i, \pi + \varphi_i)}{I_{0iq}} \quad (4)$$

将式(3)带入式(1)和式(2)，利用迭代法进行求解，可得到含泡沫海面的零阶和一阶后向散射系数分别为：

$$\sigma_{pq}^{(0)}(\theta_i) = 4\pi \cos\theta_i \frac{I_{sp}^{(0)}(\theta_i, \pi + \varphi_i)}{I_{0iq}(\pi - \theta_i, \varphi_i)} = \sigma_{pq0}(\theta_i) e^{-2k_e d \sec\theta_i} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{hh}^{(1)}(\theta_i) &= \frac{3}{4} \cos\theta_i \frac{k_s}{k_e} (1 - e^{-2k_e d \sec\theta_i}) + \\ &\frac{3}{4} \cos\theta_i \frac{k_s}{k_e} |R_{hh}|^4 e^{-2k_e d \sec\theta_i} (1 - e^{-2k_e d \sec\theta_i}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{vv}^{(1)}(\theta_i) &= \frac{3}{4} \cos\theta_i \frac{k_s}{k_e} (1 - e^{-2k_e d \sec\theta_i}) + \\ &\frac{3}{4} \cos\theta_i \frac{k_s}{k_e} |R_{vv}|^2 e^{-2k_e d \sec\theta_i} (1 - e^{-2k_e d \sec\theta_i}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中：粒子散射系数 k_s 、消光系数 k_e 与粒子体积占空比成正比； R_{h0} 、 R_{v0} 分别表示水平极化与垂直极化的非涅尔反射系数。

泡沫覆盖率与海面上方的风速有着密切的联系，当大气处于稳态时，泡沫覆盖率可表示为：

$$C = 2.32 \times 10^{-6} U_{10}^{3.4988} \quad (8)$$

因此，针对含泡沫海面，可采用 VRT 对 SSA 后向散射

系数进行修正，其后向电磁散射系数可表示为^[5]：

$$\sigma_{pq}(\theta_i) = C(\sigma_{pq}^{(0)}(\theta_i) + \sigma_{pq}^{(1)}(\theta_i)) + (1-C)\sigma_{pq}^{SSA}(\theta_i) \quad (9)$$

式中： σ_{pq}^{SSA} 为采用小斜率近似求解的单纯海面的后向散射系数。

1.2 Maxwell-Garnett 混合介质模型

考虑如图2所示的泡沫海面混合介质模型，泡沫—海水的等效介电常数 ϵ_{eff} 可以用混合介质中的平均电感应强度和平均电场进行表示，即 $\epsilon_{\text{eff}} = \langle \bar{\mathbf{D}} \rangle / \langle \bar{\mathbf{E}} \rangle$ 。混合介质中的平均电感应强度和平均电场可表示为：

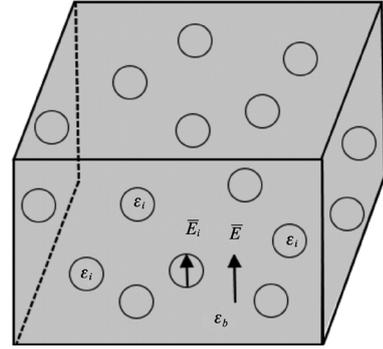


图2 同种介质组成的均匀混合介质模型图

Fig. 2 A homogeneous mixed media model consisting of the same medium

$$\begin{cases} \langle \bar{\mathbf{D}} \rangle = \frac{\bar{I}_D}{V} = \frac{1}{V} \left[\int_{V-\sum V_i} \epsilon_b \bar{\mathbf{E}}(\bar{\mathbf{r}}) dv + \sum_i \int_{V_i} \epsilon_i \bar{\mathbf{E}}_i(\bar{\mathbf{r}}) dv \right] \\ \langle \bar{\mathbf{E}} \rangle = \frac{\bar{I}_E}{V} = \frac{1}{V} \left[\int_{V-\sum V_i} \bar{\mathbf{E}}(\bar{\mathbf{r}}) dv + \sum_i \int_{V_i} \bar{\mathbf{E}}_i(\bar{\mathbf{r}}) dv \right] \end{cases} \quad (10)$$

式中： \bar{I}_D 、 \bar{I}_E 分别代表电感应强度和电场在体积 V 中的总积分。求解 Laplace 方程，可得到球形介质颗粒在均匀背景介质中的内外电场强度为：

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{E}}_{\text{in}} = \frac{3\epsilon_b}{\epsilon_i + 2\epsilon_b} \bar{\mathbf{E}} \\ \bar{\mathbf{E}}_{\text{out}} = r_0 \left[\bar{\mathbf{E}} \cos\theta_s + \frac{\epsilon_i - \epsilon_b}{\epsilon_i + 2\epsilon_b} \frac{2\bar{\mathbf{E}}R^3 \cos\theta_s}{r^3} \right] + \\ \theta_i \left[-\bar{\mathbf{E}} \cos\theta_s + \frac{\epsilon_i - \epsilon_b}{\epsilon_i + 2\epsilon_b} \frac{2\bar{\mathbf{E}}R^3 \cos\theta_s}{r^3} \right] \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)带入式(10)得到泡沫—海水等效介电常数为：

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_b + 3f \epsilon_b \frac{\epsilon_i - \epsilon_b}{\epsilon_i + 2\epsilon_b - f(\epsilon_i - \epsilon_b)} \quad (12)$$

式中： ϵ_b 、 ϵ_i 分别代表海水的介电常数和泡沫粒子的介电常数。 f 代表泡沫粒子体积占空比， $f = (0.01e^{0.06u_{10}} - 0.011) / d$ ， d

为泡沫层的厚度。

2 数值结果分析

本文选取的海水温度为 22℃, 盐度为 3.5%, 海水的介电常数可由 Dybe 算出^[6]。将泡沫看作是海水包裹空气构成的多物质, 因此泡沫的介电常数可由海水的介电常数算出^[7]。

图 3 给出了采用 M-G 模型求得的不同风速 HH 极化下单纯海面与覆盖泡沫海面散射回波多普勒谱的比较。其

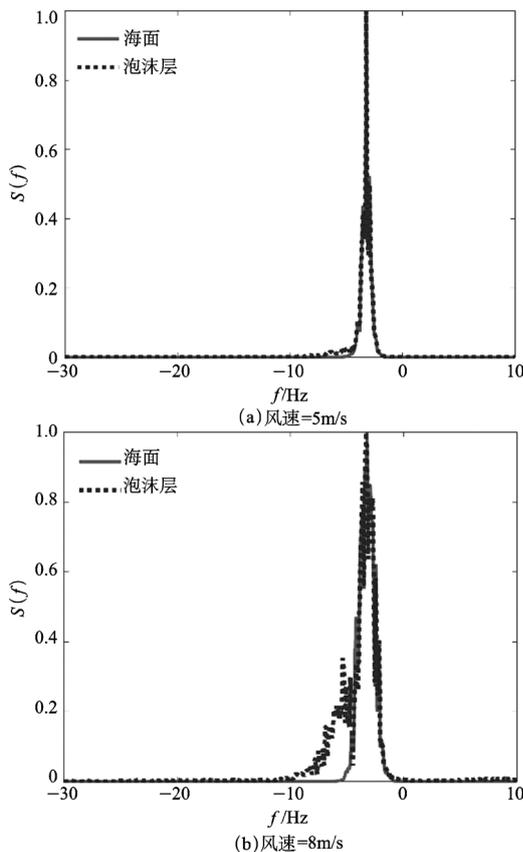


图 3 不同风速下 HH 极化多普勒谱对比图

Fig. 3 HH polarization Doppler spectrum comparison diagrams at different wind speeds

中风向角为 0°、入射波频率为 1GHz、电磁波入射角为 80°。通过比较可以发现, 随着风速的增大, 多普勒展宽也在变大, 这是由于风速影响着海面轮廓上的各点随时间上下振动的幅值, 风速越大, 幅值变化越明显。虽然泡沫是依赖于海面的运动而运动, 但其相对速度还是存在着少许差异, 而且它们所携带的能量也不同。泡沫层在被雷达观测时会明显区别于海背景, 其属于海上目标被观测到的一种现象。在 80° 入射角下, 覆盖泡沫海面的后向散射场会强于单纯海面的后向散射场, 泡沫的非线性作用会使得在原有海面的基础上产生一个新的峰值, 该峰值对应的频率值也就是泡沫层的

多普勒频移。而且随着风速的增大, 该峰值会越来越明显。

采用与图 3 相同的条件, 图 4 给出了 VV 极化多普勒谱对比图。单独讨论展宽的变化, VV 极化与 HH 极化的变化情况是类似的。但同等风速下, VV 极化的峰值远高于 HH 极化的峰值, 原因在于: 针对单纯海面而言, 海面介电常数的变化对 VV 极化散射振幅的影响更大, 因此采用等效介电常数模型对覆盖泡沫海面处的介电常数进行修正后, 使得该位置的介电常数降低, 导致了泡沫引起的尖峰在 VV 极化

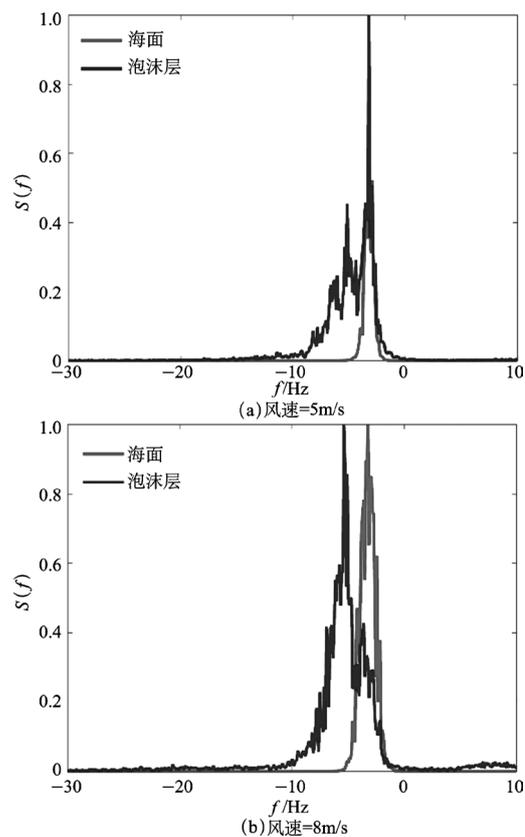


图 4 不同风速下 VV 极化多普勒谱对比图

Fig. 4 VV polarization Doppler spectrum comparison diagrams at different wind speeds

下比 HH 极化更高。且 VV 极化在低风速时仅仅是产生了一个新的峰值, 当风速增大过程中, 新的峰值会不断增长, 并最终取代了单纯海面的峰值, 也可以理解成覆盖泡沫海面的多普勒频移相对于单纯海面的多普勒频移发生了偏移, 向更大频率方向发生了移动。原因在于风速越大, 泡沫层覆盖的面积越广, 其引起的散射场在总场中占据着更加重要的地位, 泡沫层引起的尖峰已取代了原有海面的尖峰。反映到归一化多普勒谱中, 高风速下 VV 极化的多普勒谱频移就会发生偏移, 这与 HH 极化的变化趋势是有所区别的。

在高频情况下, 需要采用 VRT 修正模型来讨论泡沫层

对海面的影响。图 5 给出了 $f=10\text{GHz}$ 和 $f=14\text{GHz}$ 两种情况时, HH 极化下单纯海面与覆盖泡沫海面多普勒谱对比图。由于高频段多普勒谱的展宽过大, 振动过程过于剧烈, 不利于观察, 因此本文是把功率谱密度结果值取 \log 后再进行绘图。

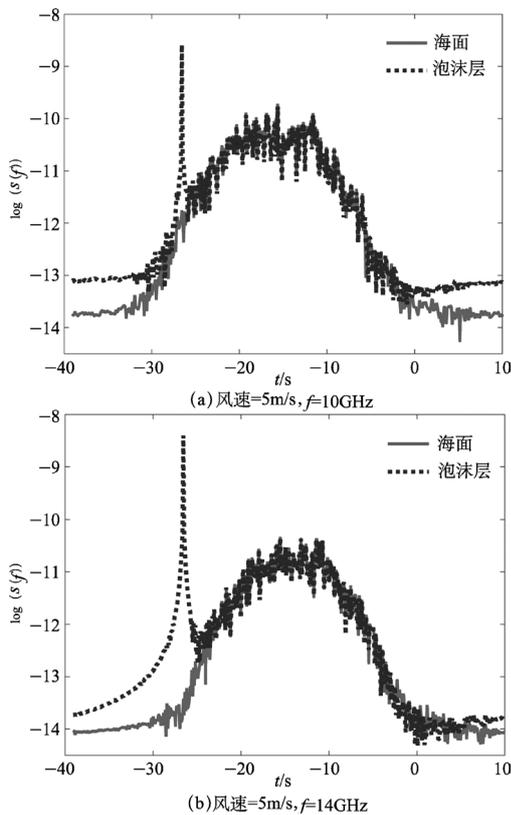


图 5 不同频率下 HH 极化多普勒谱对比图

Fig. 5 HH polarization Doppler spectrum comparison diagrams at different frequencies

通过对比可以发现, 随着入射波频率的增大, 新的尖峰生长的趋势也越加明显。原因在于海面和泡沫层的散射场强度都与入射波频率相关, 在相同条件下, 入射波频率越高, 海面的散射截面在数值上越小, 然而此时采用 VRT 模型计算泡沫层的散射截面在数值上会随着入射波频率的增高而增大, 因而反映到效果图上会出现如此结果。其次可以看到, 随着入射波频率的升高, 含泡沫海面的多普勒谱展宽会发生拓宽现象。原因在于高频段入射波的波长较短, 对海面细微之处的鉴别能力较强, 泡沫本就属于离散状态, 而且泡沫的组成粒子更为细小不可见, 需要波长非常短的电磁波才能识别出来。所以入射波频率的升高对泡沫的影响更大。图 6 给出了风速 5m/s 时单纯海面与覆盖泡沫海面雷达回波多普勒谱频移及展宽的比较。可以观察到两幅曲线图共同的特点都是随着入射角度的增大, 曲线的变化趋势也在不断增大, 当入射角到达 25° 后开始减小, 当入射角为 30° 时纵坐标达到最小值, 此后

曲线整体呈上升趋势。在入射角小于 30° 范围内, 泡沫的存在与否对于多普勒频移及展宽并没有明显的区别。但随着入射角度的不断增大, 覆盖泡沫海面多普勒频移及展宽均明显大于单纯海面的多普勒频移及展宽, 且 VV 极化的数值会远远高于 HH 极化, 两者之间的差距也越来越显著。

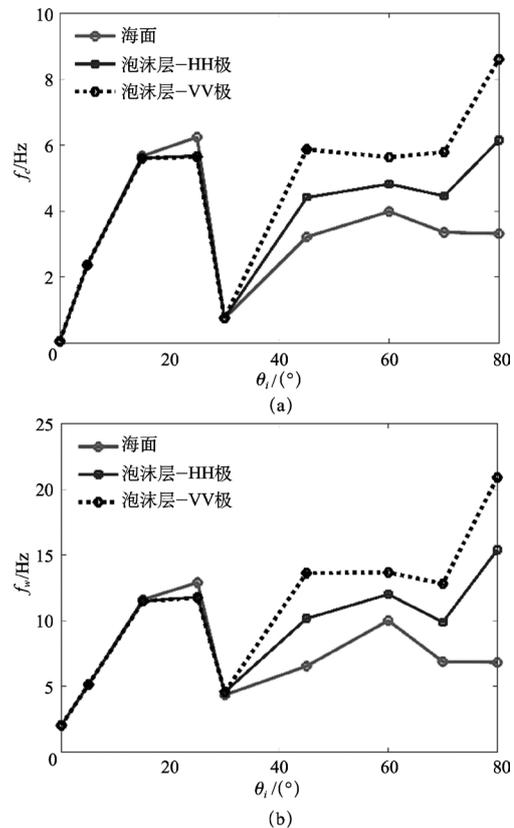


图 6 多普勒频移及展宽对比图

Fig. 6 Doppler shift and spread comparison diagrams

3 结论

本文基于二维线性覆盖泡沫海面模型及使用粗糙面电磁散射的一阶小斜率近似方法, 结合 VRT 和 M-G 修正模型, 分别计算了不同入射波频率、风速、极化下泡沫层对海面多普勒频移及展宽的影响。通过计算结果的比较可以看出, 由于风速的大小决定着海面上方泡沫的覆盖率, 因此随着风速的增大, 覆盖泡沫海面的多普勒谱会出现一个新的峰值, 甚至在 VV 极化下频移会发生移动。而且随着入射波频率的增高, 泡沫层对海面多普勒谱的影响越来越不可忽视。结果表明, VRT 和 M-G 修正模型能够很好地求解不同频段泡沫层对海面多普勒谱的影响。需要说明的是, 本文所采用的海面并没有考虑卷浪等其他特殊的海洋水体现象, 且由于试验数据的缺乏, 多普勒谱结果图未能够与试验结果进行对比。

参考文献

- [1] 梁玉, 郭立新. 气泡/泡沫覆盖粗糙海面电磁散射的修正双尺度法研究[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6155-6166.
Liang Yu, Guo Lixin. Study of the electromagnetic scattering from the rough sea surface with bubbles/foams by the modified two-scale method[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9): 6155-6166. (in Chinese)
- [2] 亓晓, 韩香娥. 覆盖泡沫粗糙海面的激光散射特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 362-368.
Qi Xiao, Han Xiang. Study on laser scattering characteristics of foam covered rough sea surface[J]. Journal of Optics, 2015, 35(8): 362-368. (in Chinese)
- [3] 金亚秋. 矢量辐射传输理论和参数反演[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1994.
Jin Yaqiu. Vector radiative transfer theory and parameter inversion[M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1994. (in Chinese)
- [4] Mallet P, Guerin C A, Sentenac A. Maxwell-Garnett mixing rule in the presence of multiple scattering: Derivation and accuracy[J]. Physical Review B, 2005, 72(1): 205-214.
- [5] 李可可, 刘伟, 郭立新, 等. VRT和M-G模型对含泡沫海面电磁散射特性的修正效应研究[J]. 航空兵器, 2018(3): 49-52.
Li Keke, Liu Wei, Guo Lixin, et al. Modification on electromagnetic scattering characteristics from foam sea surface by VRT and M-G model[J]. Aero Weaponry, 2018(3): 49-52. (in Chinese)
- [6] 焦培南, 张忠治. 雷达环境与电波传播特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
Jiao Peinan, Zhang Zhongzhi. Radar environment and radio wave propagation characteristics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [7] 杨晓维. 含泡沫层动态海面电磁散射修正双尺度研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
Yang Xiaowei. Research on electromagnetic scattering modified dual-scale study of dynamic sea surface with foam layer[D]. Xi'an: Xidian University, 2008. (in Chinese)

作者简介

刘伟(1979-) 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 海洋环境遥感及其电磁散射。

Tel: 13619227300 E-mail: liuwei@mail.xidian.edu.cn

Doppler Spectral Frequency Shift and Widening Characteristics of Scattered Echoes from Dynamic Foam-sea Surface

Liu Wei^{1,*}, Zhang Ying¹, Li Keke¹, Liu Guangjun²

1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang 471009, China

Abstract: In order to study the electromagnetic scattering of dynamic sea surface in high sea conditions, the electromagnetic scattering effect of foam must be applied in the calculation of sea surface electromagnetic scattering. Based on the small slope approximation and the physical mechanism of Doppler spectrum, the Doppler spectrum characteristics of foam-containing sea surface were compared with the one of pure sea surface, by the equivalent dielectric constant model in mid-to-low frequency and vector radiation transmission theory in high frequency, respectively. In addition, the effects of wind speed, incident wave frequency and other factors on Doppler shift and broadening were discussed. The results show that the effect of the foam layer on sea surface is not negligible, which compensate for the limitation of the small slope approximation under some circumstances.

Key Words: electromagnetic scattering; foam-sea composite model; Doppler spectrum; small slope approximation; maxwell-garnett model; vector radiation transmission

Received: 2018-04-04; Revised: 2018-04-25; Accepted: 2018-07-05

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20150181003); National Natural Science Foundation of China (41406201)

*Corresponding author. Tel.: 13619227300 E-mail: liuwei@mail.xidian.edu.cn