

基于不同散射机制特征的海杂波时变多普勒谱模型

张金鹏 张玉石 李清亮 吴家骥

A time-varying Doppler spectrum model of radar sea clutter based on different scattering mechanisms

Zhang Jin-Peng Zhang Yu-Shi Li Qing-Liang Wu Jia-Ji

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 034101 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171612

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20171612>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[圆环结构磁光光子晶体中的拓扑相变](#)

Topological phase transitions in core-shell gyromagnetic photonic crystal

物理学报.2017, 66(22): 224102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.224102>

[可用于拓宽光波单向传输带宽的光子晶体异质结构界面](#)

Interface of photonic crystal heterostructure for broadening bandwidth of unidirectional light transmission

物理学报.2017, 66(20): 204103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204103>

[高极化纯度的超表面透镜设计与应用](#)

Design and application of high polarized purity metasurface lens

物理学报.2017, 66(20): 204102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204102>

[基于石墨烯的太赫兹波散射可调谐超表面](#)

Graphene based tunable metasurface for terahertz scattering manipulation

物理学报.2017, 66(20): 204101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204101>

[基于超材料的吸波体设计及其波导缝隙天线应用](#)

Design of metamaterial absorber and its applications for waveguide slot antenna

物理学报.2012, 61(18): 184101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.184101>

基于不同散射机制特征的海杂波 时变多普勒谱模型*

张金鹏^{1)2)†} 张玉石¹⁾ 李清亮¹⁾ 吴家骥²⁾

1)(中国电波传播研究所, 电波环境特性及模化技术重点实验室, 青岛 266107)

2)(西安电子科技大学电子工程学院, 西安 710071)

(2017年7月13日收到; 2017年9月6日收到修改稿)

海杂波的多普勒谱建模对采用多普勒处理技术的雷达进行有效的海杂波抑制和目标检测具有重要的意义. 本文分别考虑 Bragg, 白冠和破碎波三种散射机制对应的多普勒谱分量的特征, 对三种谱分量的频移和展宽进行分离, 并引入附加速度频移量, 提出了基于不同散射机制特征的雷达海杂波时变多普勒谱模型. 该模型假设谱强度为受观测时间区间影响的随机变量, 能够同时适用于平均多普勒谱与短时多普勒谱建模. 通过分别对黄海海域实测的岸基 P, S 波段海杂波平均多普勒谱与短时多普勒谱建模测试, 结果表明该模型相对传统模型的建模精度更高, 尤其体现在短时谱的观测时间较长和平均谱形式较为复杂的情况下, 建模误差显著减小.

关键词: 雷达海杂波, 多普勒谱, 建模方法

PACS: 41.20.Jb, 43.28.We

DOI: 10.7498/aps.67.20171612

1 引言

雷达海杂波多普勒谱本质上是一种用于表征海杂波在各频带上能量分布的功率谱, 由于海面风力及重力、张力的作用通常导致海面散射体处于运动状态, 而这种雷达与散射体之间的相对运动又会引起雷达相干脉冲间的相位变化, 使其产生多普勒频移, 因此也称为多普勒谱. 海杂波的多普勒谱建模研究对采用多普勒处理技术的雷达进行有效的海杂波抑制和目标检测具有重要的意义^[1-3].

海杂波多普勒谱的建模需基于相应的物理机理和特性研究. 早在 20 世纪 60 年代, Pidgeon^[4] 就利用 C 波段小擦地角海杂波数据分析了多普勒谱的特性, 认为海面散射主要由海面小尺度毛细波产生的 Bragg 散射起主导作用, 并由此解释海杂波的多普勒谱特征. 到 90 年代, 多个独立的海杂波

观测实验发现, 单纯通过 Bragg 散射机制并不能完全解释海杂波多普勒谱的特性. 因此, Lee 等^[5] 和 Walker^[6] 开展了专门的海杂波谱特性研究实验, 通过结合同步录取的海浪视频信息, 研究了海面演化过程中各海面结构对海杂波谱的贡献, 分析了海面不同散射机制与海杂波谱特性的关联. 近年来, 以 Rosenberg 等^[7-9] 为代表的澳大利亚国防科技部研究人员对海杂波的幅度、相关和谱等特性进行了研究, 其中包括不同雷达参数和不同海况下的海杂波多普勒谱特性分析. Corretja 等^[10] 对小擦地角下的海杂波多普勒谱特性进行了统计分析, 并对比了经验模型与实验数据的符合程度.

根据海杂波多普勒谱产生的物理机理, 在海杂波观测时间不同的情况下, 其多普勒谱表现出不同的形状与非平稳特性^[11,12]. 因此, 海杂波多普勒谱的建模主要从两方面开展研究. 一是针对平均多普勒谱形状的建模, 即较长时间(通常大于重力波周

* 国家自然科学基金(批准号: 61401342)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhjinpeng@hotmail.com

期, 秒级) 海杂波谱的平均特性建模. Lee 等 [5] 首先采用多组实测数据分析的方式, 研究了平均多普勒谱形状的特点和规律, 提出了谱线形状分解为三种具有物理意义基函数的建模方法, 每种基函数用于表征不同的散射机制. Walker [6,13] 在上述建模方法的基础上, 利用造浪池海杂波数据深入分析了海浪从产生到破碎全过程的多普勒谱变化规律, 建立了一种简化的三分量海杂波平均多普勒谱模型. 该模型利用三个高斯函数分别表征 Bragg, 白冠和破碎三种散射机制的谱分量, 在大部分情况下可以成功对实测海杂波多普勒谱形状进行建模.

海杂波多普勒谱建模的第二个方面是短时动态多普勒谱的建模, 即对较短观测时间内 (通常小于重力波周期, 大于白冠和破碎散射的去相关时间) 谱形状及其变化特性的建模 [14]. Miller 和 Dawber [15] 在短时谱建模中做了开创性工作, 他们分析了多波段雷达的海杂波数据, 建立了高斯函数形式的谱结构, 并由两个服从伽马分布的变量对其进行调制的短时多普勒谱模型. 考虑到实际的短时谱结构通常是非高斯的, Ward 等 [16] 提出了采用复合 K 分布中的伽马函数对短时谱强度进行调制, 利用两个高斯函数对谱形状进行描述的短时多普勒谱建模方法. 该方法在后来的短时谱建模中得到了成功应用, 但由于该模型中假定海面的 Bragg 散射谱分量具有零多普勒频移, 且白冠散射和破碎波散射共享相同的多普勒频移和展宽, 因此该模型在部分实测海杂波短时谱建模中精度不高.

本文考虑上述传统模型的缺点, 提出了一种新的动态谱模型, 称为时变多普勒谱模型. 该模型能够同时适用于平均多普勒谱与短时多普勒谱的建模, 其性能通过黄海海域实测的 P 波段和 S 波段岸基海杂波数据进行了验证.

2 海杂波多普勒谱建模方法

海杂波的多普勒谱特性与海表面的运动和扰动状态密切相关, 雷达与海面散射体之间的相对运动使得电磁波产生多普勒频移, 而海面散射体运动的随机性使得多普勒谱具有一定的展宽. 因此, 海杂波多普勒谱的建模方法需要基于多普勒谱的物理机理分析.

在假设雷达分辨单元内海浪相对雷达的运动速度基本不变的情况下, 海杂波的多普勒频移可以

表示为

$$f_{\text{Doppler}} = \frac{2V}{\lambda} \cos \varphi, \quad (1)$$

多普勒展宽可以表示为

$$\Delta f_{\text{Doppler}} = \frac{2V}{\lambda} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \cos \varphi, \quad (2)$$

式中, λ 为电磁波波长; V 为海浪相对雷达的运动速度; φ 为海浪速度方向与雷达视向的夹角; θ_1, θ_2 分别为对应分辨单元前后两边缘的擦地角.

对实际的动态海面而言, 它是在近似周期的风浪和涌浪上叠加着小尺度的波纹、泡沫和浪花, 每种散射体的运动速度和方向不尽相同. 对海杂波多普勒谱而言, 其谱特性直接与动态海面的多种散射机制有关, 相应地表现为多普勒谱包含多种谱分量 [17,18]. 通常情况下, 谱形状的建模需根据具体情形考虑如下三种散射机制谱分量.

1) Bragg 散射谱分量

海面 Bragg 散射指的是当海浪波长在入射电磁波方向的投影等于电磁波半波长的整数倍时产生的谐振 (相干) 散射. 海浪波长与电磁波波长的关系为

$$\Lambda \cos(\theta) = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

式中, Λ 为谐振海浪波长, λ 为电磁波波长, θ 为擦地角.

根据 (3) 式给出的产生谐振散射的条件可知, Bragg 散射通常发生在两种尺度的海浪结构上. 当雷达频率较低时, 布拉格散射主要来自于海面的重力波结构, 而当雷达频率较高时, Bragg 散射主要来自于海面的张力波结构. 对存在两种海浪尺度的复合海面模型而言, Bragg 散射回波的多普勒频移为

$$f_{\text{Doppler}} = \frac{2}{\lambda} (v_B + v_D), \quad (4)$$

式中, v_B 代表 Bragg 谐振散射波速度; v_D 代表重力波的漂移和轨道速度, 用于对张力波进行调制.

对于 P 及以下波段而言, 由于 Bragg 散射主要来自海面重力波结构, 而重力波可沿雷达视向接近或远离观测点运动, 因此海杂波多普勒谱中经常出现两个关于零频对称的谱峰 [19].

2) 破碎散射谱分量

海浪的破碎散射指的是强风驱使下的海浪破碎波对电磁波的准镜面反射, 该散射机理使得在较高海况下, L 及以上波段的小擦地角海杂波多普勒谱中经常含有独特的破碎散射谱分量 [20].

由于破碎散射来源于准镜面反射, 且海浪破碎波的运动速度明显高于 Bragg 散射波, 因此海杂波的破碎散射谱分量具有以下特点^[16]:

① 破碎散射谱分量在水平极化下较强, 而由于多径的影响, 其在垂直极化下非常弱, 甚至不存在;

② 破碎散射的多普勒谱频移大于 Bragg 散射的多普勒谱频移, 谱展宽较窄, 小于 Bragg 散射的谱展宽;

③ 由于海浪的破碎过程很短, 因此破碎散射的持续时间通常在 0.2 s 左右, 在该持续时间内海杂波时间序列是相关的, 海杂波谱在该时间内具有明显的谱形状变化.

3) 白冠散射谱分量

白冠散射指的是雷达波照射在海浪破碎后形成的泡沫浪花上的后向散射. 海浪的破碎散射和白冠散射是顺序发生的, 白冠散射之前必然已经产生破碎散射, 而破碎散射之后却不总有白冠散射发生. 由于海面白冠层呈现了体散射特点, 极化不敏感性导致了 HH 和 VV 极化下该散射几乎具有相同的强度. 白冠散射持续时间长(秒级)但相关时间极短(几个毫秒). 体现在海杂波的多普勒谱上, 白冠散射的多普勒谱频移取决于重力波的相速度, 远大于 Bragg 散射的谱频移, 而由于白冠散射来源于近随机的泡沫浪花的后向体散射, 因此白冠散射的多普勒谱具有类似于噪声的宽多普勒谱特点.

通常情况下, 一般的实测海杂波多普勒谱可以结合上述的三种谱分量对其进行描述和建模, 但由于实际的动态海面还可能受一些不确定因素的扰动, 因此特殊的海杂波多普勒谱需要根据实际情况进行物理机理分析与建模.

3 海杂波多普勒谱模型

3.1 传统多普勒谱模型

在长时平均多普勒谱和短时动态多普勒谱建模中, 实用性较高且被广泛接受的模型分别为引言中介绍的 Walker 模型^[13]和 Ward 模型^[16].

Walker 海杂波多普勒谱模型是一种简化的 Lee 模型, 适用于对观测时间大于重力波周期(通常为几秒)的海杂波多普勒谱进行建模, 属于一种长时平均谱模型. 该模型假定三种不同散射机制的谱分量都使用高斯谱线函数来描述, 对于 HH 极化,

谱模型形式为

$$S_{HH}(f) = B_H \exp\left[\frac{-(f - f_B)^2}{w_B^2}\right] + W \exp\left[\frac{-(f - f_P)^2}{w_W^2}\right] + S \exp\left[\frac{-(f - f_P)^2}{w_S^2}\right]. \quad (5)$$

对于 VV 极化, 谱模型形式为

$$S_{VV}(f) = B_V \exp\left[\frac{-(f - f_B)^2}{w_B^2}\right] + W \exp\left[\frac{-(f - f_P)^2}{w_W^2}\right], \quad (6)$$

式中, f 为频率; f_B 和 f_P 分别为对应 Bragg 谐振波速度和重力波相速度的多普勒频率; B , W 和 S 分别代表 Bragg、白冠和破碎散射分量的强度, w_B , w_W 和 w_S 分别代表三种谱分量的多普勒展宽.

Ward 模型适用于对观测时间小于重力波周期但大于海浪破碎散射和白冠散射去相关时间的海杂波多普勒谱进行建模, 属于一种短时多普勒谱模型. 该模型假定多普勒谱形状被一个符合 Γ 分布的随机功率变量所调制, 在某一短观测时间内, 该变量为常数, 多普勒谱形状分解成谐振波高斯谱分量和非谐振波高斯谱分量两部分. 其模型形式如下:

$$S(f) = x \frac{A \hat{S}(f, w_{\text{Bragg}}, 0) + x \hat{S}(f, w_{\text{Breaking}}, f_d)}{A + x}, \quad (7)$$

其中

$$\hat{S}(f, w, f_d) = \frac{\exp[-(f - f_d)^2/2w^2]}{\sqrt{2\pi w^2}}. \quad (8)$$

(7) 式分子中第一项对应于 Bragg 散射(谐振波散射)的多普勒谱分量, 多普勒频移为零且多普勒展宽为 w_{Bragg} ; 第二项对应于海浪破碎波散射和白冠散射(非谐振波散射)的多普勒谱分量, 具有多普勒频移 f_d 和多普勒展宽 w_{Breaking} ; x 为随观测时间区间变化且服从 Γ 分布的功率调制因子, A 为谱幅度.

3.2 时变多普勒谱模型

上述两种传统的多普勒谱模型在实际的谱建模中都存在一定的局限性且适用范围互不重叠, 本文在此基础上提出了一种时变多普勒谱模型, 克服了传统模型的谱形状建模的局限性, 且从物理意义上其适用范围包含长时平均谱和短时动态谱建模. 该模型的建立主要考虑以下三个方面.

1) Ward 短时谱模型认为 Bragg 散射具有零多普勒频移. 然而, 从散射机理上考虑, 由于海浪存在大尺度重力波的运动, 实际的 Bragg 散射是存在多普勒频移的, 且当雷达波长较长、趋近于重力波长时, 多普勒频移更为明显. 因此, 本文提出的时变多普勒谱模型中引入了 Bragg 散射的多普勒频移.

2) Ward 模型假定海杂波破碎散射和白冠散射机制共同产生一个高斯谱分量, 具有相同的多普勒频移和展宽. 然而, 根据多普勒谱物理机理可知, 两种散射的产生机理和相关时间并不相同, 谱分量具有不同的频移和展宽特性. 因此, 在本文提出的时变多普勒谱模型中, 认为海杂波多普勒谱由来自 Bragg, 白冠和破碎三种散射机制的三个谱分量组成, 且频移和展宽不同.

3) Walker 谱模型中白冠散射和破碎散射共享相同的多普勒频移, 这与实际情况是不相符的. 在实际的动态海面中, 海面白冠通常是附着在重力波上以其相速度运动的, 而海面的破碎波(这里指未完全破碎之前的卷浪结构)通常在重力波相速度的基础上还附加了一个由瞬时风和垂直重力加速度引起的附加速度, 因此本文在提出的时变多普勒谱模型中, 将破碎散射谱分量的谱频移认为由重力波相速度引起的频移和附加速度引起的频移两部分组成.

鉴于以上三点考虑, 并将三个谱分量的谱强度假设为受海杂波观测时间(谱估计时间)区间影响的随机变量, 提出海杂波时变多普勒谱模型如下:

$$\begin{aligned} S_{HH}(f, t|\Delta t) &= I_{Bh}(t|\Delta t) \cdot \Psi_B(f) + I_{W}(t|\Delta t) \cdot \Psi_W(f) \\ &+ I_S(t|\Delta t) \cdot \Psi_S(f), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} S_{VV}(f, t|\Delta t) &= I_{Bv}(t|\Delta t) \cdot \Psi_B(f) + I_{W}(t|\Delta t) \cdot \Psi_W(f), \end{aligned} \quad (10)$$

式中

$$\Psi_B(f) = \exp \left[-\frac{(f - f_B)^2}{w_B^2} \right], \quad (11)$$

$$\Psi_W(f) = \exp \left[-\frac{(f - f_G)^2}{w_W^2} \right], \quad (12)$$

$$\Psi_S(f) = \exp \left\{ -\frac{[f - (f_G \pm \Delta f_s)]^2}{w_S^2} \right\}. \quad (13)$$

这里, I_B , I_W 和 I_S 分别为当雷达观测时间为 Δt 情况下随时间动态变化的 Bragg, 白冠和破碎散射谱分量的强度; Ψ_B , Ψ_W 和 Ψ_S 为三种散射谱分量的谱

线形状基函数; f_B 和 f_G 分别为对应 Bragg 谐振波和重力波相速度的多普勒频率; Δf_s 表示由瞬时风和垂直重力加速度引起的在重力波相速度基础上的附加速度频移量, 当重力波相速度频移量 f_G 为正时, Δf_s 前的符号取正, 反之相反. 该符号在物理意义上表征附加速度是沿着重力波相速度方向的.

值得注意的是, 该时变多普勒谱模型中, 三个谱分量的强度之和 $I_B + I_W + I_S$ 符合 K 分布中的调制分量 Γ 分布. 在对 (9)—(13) 式给出的时变多普勒谱进行参数优化时, 需附加约束条件:

$$\text{abs}(f_G) > \text{abs}(f_B). \quad (14)$$

此条件可以保证白冠散射和破碎散射的多普勒频移(主要来自于重力波相速度)大于 Bragg 散射的谱频移, 这与海面散射机理是相符的.

4 模型性能的实验数据验证

本文基于黄海海域实测的岸基 P 波段和 S 波段雷达海杂波数据, 利用提出的时变多普勒谱模型对实测数据的短时谱和平均谱进行了建模, 并分别与传统的 Ward 短时谱模型和 Walker 平均谱模型建模结果进行了对比, 验证了模型性能.

4.1 短时谱建模性能验证

图 1 给出了一组岸基 P 波段雷达海杂波数据在 40 s 时间内的短时多普勒谱, 通过非参数化的 Welch 法估计得到. 测量雷达为全相参脉冲体制, 脉冲重复频率为 1 kHz. 相应的测量条件为: 2 级海况、顺浪向, 擦地角为 5.2° . 谱估计过程中, 先后将海杂波数据分成 400 个和 40 个观测时间区间, 每个区间的长度分别为 100 ms 和 1000 ms, 相应的短时谱估计中每个观测时间区间的脉冲数分别为 100 和 1000.

从图 1 可以看出, 在观测时间为 100 ms 的情况下, 多普勒谱形状中关于零频对称的两个 Bragg 峰非常明显, 这是由于观测时间较短, 可以获得海杂波动态谱精细结构的原因. 然而, 当观测时间较长(1000 ms)时, 两个 Bragg 峰已经分辨不开, 表现为一个零频附近的主峰. 若观测时间继续变长, 当大于重力波周期时, 海杂波谱将会随时间基本不变, 变为平均多普勒谱.

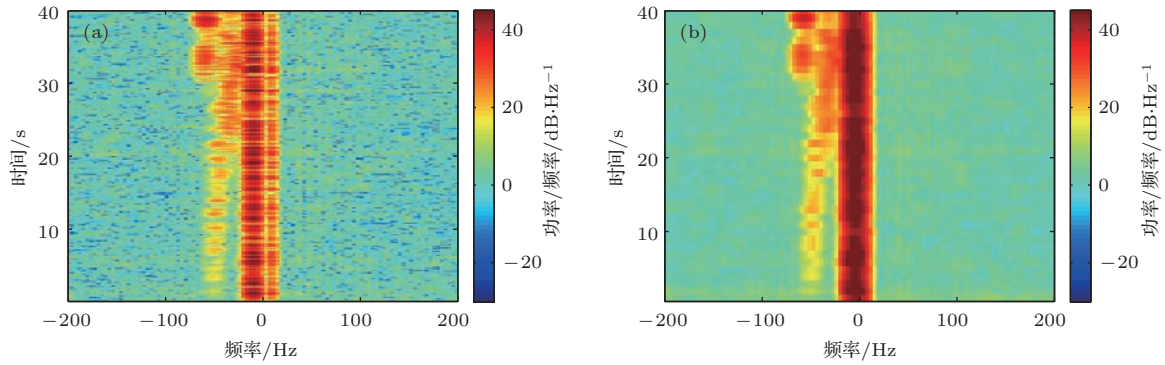


图1 不同观测时间情况下的P波段海杂波短时多普勒谱 (a) 100 ms; (b) 1000 ms

Fig. 1. Short-time doppler spectra at P band for the measured time of (a) 100 ms and (b) 1000 ms.

分别采用传统的Ward短时多普勒谱模型和本文提出的时变多普勒谱模型对图1给出的实测海杂波短时谱进行建模, 结果如图2和图3所示. 谱建模中我们引入粒子群(PSO)算法^[21]用于实测谱形状的优化, PSO初始参数设置如表1所列, 各模型参数的搜索范围根据实测谱确定. 将图2和图3分别与图1进行对比, 可以得到如下结论.

1) 两种短时谱模型都能够实现对随时间动态变化的海杂波短时多普勒谱建模, 建模结果基本能

够描述短时谱的时间非平稳性.

2) 时变谱模型建模效果优于Ward短时谱模型. 从谱的形状上来看, 时变谱模型能够较好地描述短时谱的各个谱分量, 例如图3(a)中时变谱的建模结果能够显示出多普勒谱关于零频对称的两个Bragg峰, 与图1(a)的实测谱一致. 而Ward短时谱的建模结果中, 由于假设了Bragg散射谱分量的频移为零, 两个Bragg峰被建模为一个移动到零频上的峰, 谱形状的精细结构消失. 对谱形状的建模

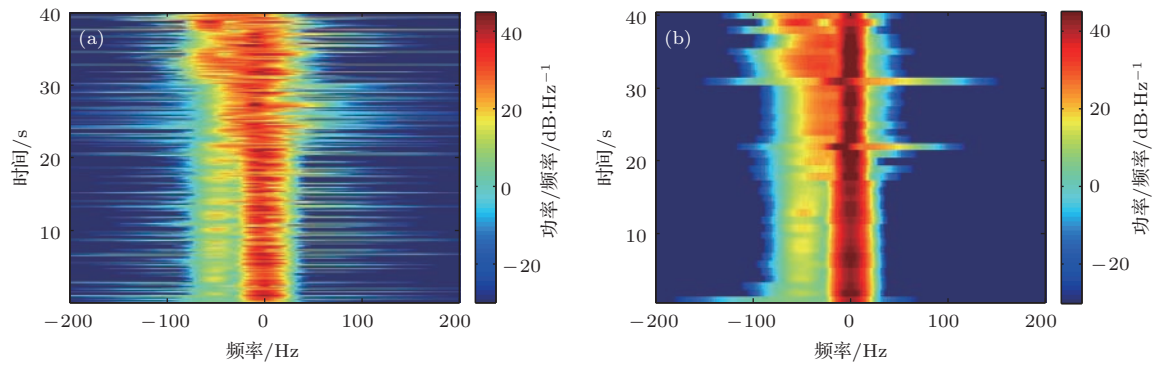


图2 Ward短时谱模型对P波段海杂波短时多普勒谱的建模效果 (a) 观测时间100 ms; (b) 观测时间1000 ms

Fig. 2. The short-time doppler spectra at P band modeled by the Ward model for the measured time of (a) 100 ms and (b) 1000 ms.

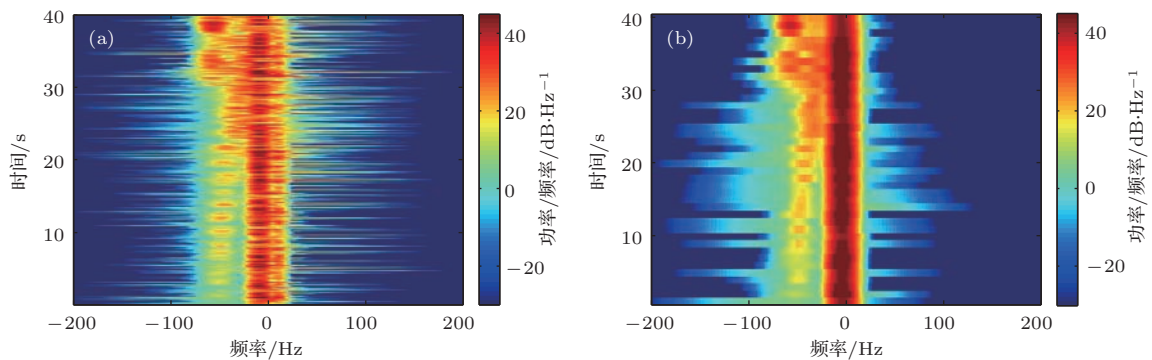


图3 时变多普勒谱模型对P波段海杂波短时多普勒谱的建模效果 (a) 观测时间100 ms; (b) 观测时间1000 ms

Fig. 3. The short-time doppler spectra at P band modeled by the introduced time-varying model for the measured time of (a) 100 ms and (b) 1000 ms.

结果差异是由谱模型的函数形式决定的, Ward 短时谱模型由两个高斯函数组成, 因此只能描述含两个谱峰的多普勒谱, 而时变谱模型在 Ward 模型基础上引入了海浪破碎波的谱分量, 因此可以描述含三个谱峰的多普勒谱.

表 1 定量地给出了两种谱模型在上述 P 波段短时谱建模中的时间与误差. 对比建模误差可以看出, 时变谱模型的建模误差总体上小于 Ward 模型. 当短时谱估计中观测时间较长 (1000 ms) 时, 时变

谱模型相对 Ward 模型建模精度提高的更大, 这是因为当观测时间较长时, 海杂波多普勒谱的精细结构不显著, 更易于建模的原因. 如图 1 (b) 中实测短时谱的精细结构不如图 1 (a) 明显, 谱建模难度降低. 在建模优化时间方面, 时变谱模型情况下的单谱 (即一个观测时长的谱) 的优化时间约为 Ward 模型的两倍, 这是由于前者的模型参数较多, PSO 优化时种群规模为后者情况的两倍. 但单谱优化时间小于 1 s, 保证了实际应用中的可行性.

表 1 P 波段短时谱建模时间与建模误差
Table 1. The times and RMS errors in modeling the short-time doppler spectra at P band.

谱模型	观测时长/ms	单谱个数	单谱优化时间/s	总优化时间/s	建模误差 (RMS)/dB	PSO 设置
Ward 模型	100	400	0.44	174.02	5.79	种群规模: 50
	1000	40	0.43	17.31	5.47	进化代数: 50 代
时变多普勒谱模型	100	400	0.98	395.41	4.09	种群规模: 100
	1000	40	0.99	39.86	1.47	进化代数: 50 代

图 4 给出了一组岸基 S 波段雷达海杂波数据在 100 s 时间内的短时多普勒谱, 通过非参数化的 Welch 法估计得到. 海杂波数据的测量模式为岸基波束驻留模式, 谱估计过程中根据雷达的相干脉冲数限制, 每个观测时间区间对应的脉冲数为 100, 时间长度约为 230 ms. 海杂波数据的测量条件为: 2 级海况、顺浪向, 擦地角为 5.5° .

从图 4 可以看出, 该组数据多普勒谱的形状随时间起伏变化, 主要体现为负频移上的多普勒主峰与正频移上较弱的多普勒次峰, 主峰的频移与展宽随时间变化较慢, 而次峰随时间变化很快, 该现象恰恰体现了实际海面速度分量的不断变化, 表现出谱的短时动态特性.

同时采用两种谱模型对图 4 给出的短时谱

进行建模, 优化算法配置同 P 波段一致, 结果如图 5 和表 2 所列. 对比图 4 和图 5 可以看出:

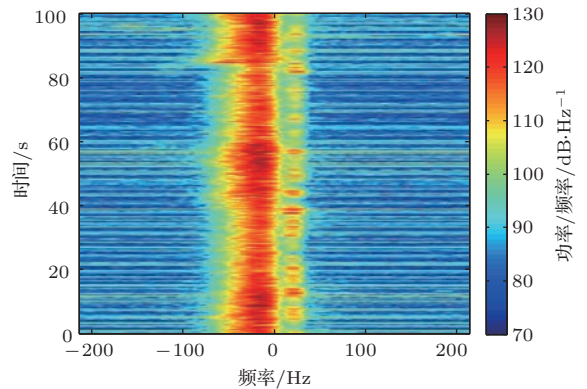


图 4 岸基 S 波段海杂波短时多普勒谱

Fig. 4. Short-time doppler spectra of shore-based radar sea clutter at S band.

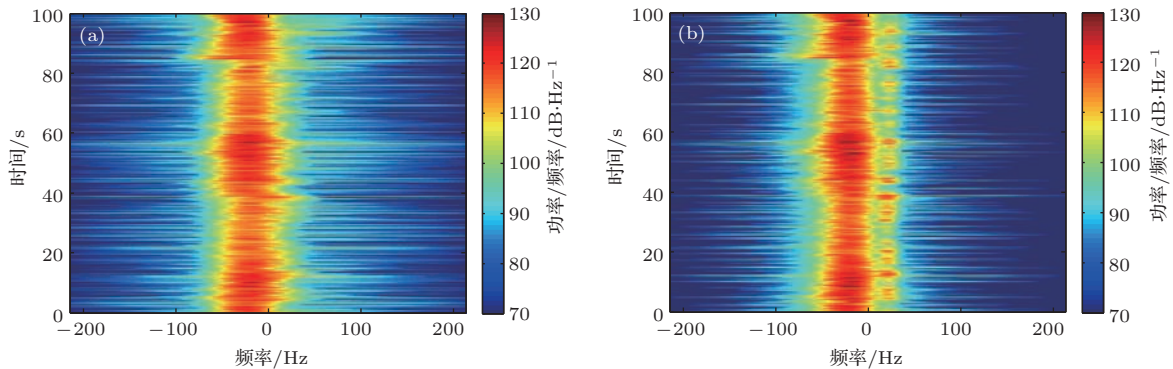


图 5 岸基 S 波段海杂波短时多普勒谱建模结果 (a) Ward 模型; (b) 时变谱模型

Fig. 5. The short-time doppler spectra at S band modeled by (a) the Ward model and (b) the introduced time-varying model.

表2 S波段短时谱建模时间与建模误差
Table 2. The times and RMS errors in modeling the short-time doppler spectra at S band.

谱模型	观测时长/ms	单谱个数	单谱优化时间/s	总优化时间/s	建模误差 (RMS)/dB	PSO 设置
Ward 模型	230	435	0.24	103.80	3.40	种群规模: 50; 进化代数: 50 代
时变多普勒谱模型	230	435	0.56	244.50	1.91	种群规模: 100; 进化代数: 50 代

1) 时变谱模型能够实现对随时间动态变化的海杂波短时多普勒谱建模, 建模结果基本能够描述短时谱的时间非平稳性;

2) 时变谱模型建模精度和稳定性优于 Ward 谱模型, 时变谱模型对于负频移上的多普勒主峰以及正频移上的多普勒次峰刻画基本准确, 而 Ward 模型建模结果基本体现不出多普勒次峰, 造成多普勒谱中的谱分量丢失.

表2定量地列出了两种谱模型在上述S波段短时谱建模中的时间与误差. 可以看出, 本文时变谱模型的建模误差明显小于 Ward 模型, 且在单谱优化时间上, 两种模型情况下都小于 1 s, 符合实际应用可行性要求.

4.2 平均谱建模性能验证

图6给出了两种谱模型对岸基P波段海杂波数据平均多普勒谱的建模效果. 两组典型数据对应的海况分别为3级和4级. 测量雷达参数与图1所示数据的雷达参数相同, 擦地角为3.6°. 实测平均谱估计所使用的杂波序列长度为60000, 对应的雷达观测时间为1 min, PSO算法的参数设置与表1相同. 从图6(a)可以看出, 在3级海况下, P波段海杂波平均谱具有两个明显的谱峰, 且在-50 Hz左右具有一个较弱的类似谱峰的突起. 本文时变谱模型和Walker谱模型都能够实现对前两个明显谱峰的准确描述, 然而对于后一个较弱的谱

突起结构, 时变谱模型的建模结果体现出了该细微结构, 而Walker谱模型忽略了该结构. 从图6(b)可以看出, 在4级海况下, P波段海杂波平均谱表现出三个明显的谱峰, 说明了较高海况下海浪的速度分量更为复杂. 在该情况下, 时变谱模型可以实现整个谱形状(三个谱峰)的准确建模, 而Walker模型忽略了正频移上的谱峰, 且对中心谱峰强度的描述也存在明显偏差.

图7给出了两组典型岸基S波段海杂波数据的平均多普勒谱. 实测谱对应的海况分别为3级和4级, 擦地角为4.1°. 谱估计所使用的杂波序列长度为60000, 对应的雷达观测时间为1 min. 从图7可以看出, 两种海况下S波段的平均谱形状相对P波段较为简单, 主要体现为单峰形式. 相对3级海况, 4级海况下的多普勒谱展宽更大, 尤其在频率-300—-50 Hz仍具有一定幅度的功率密度, 这与海面白冠散射能够引起多普勒谱的展宽效应是对应的. 说明在较高海况下, 海面出现白冠散射, 且该散射机制在海杂波中占有相当的比重.

图7还给出了两种谱模型对于上述数据建模的对比结果. 从图7可以看出, 由于谱形状表现为单峰结构, Walker谱模型和时变谱模型的建模结果基本一致, 均能实现对谱线结构的较准确的描述, 仅在一些细微结构处时变谱模型显得更为精确. 在该波段下, 时变谱模型的优势一般.

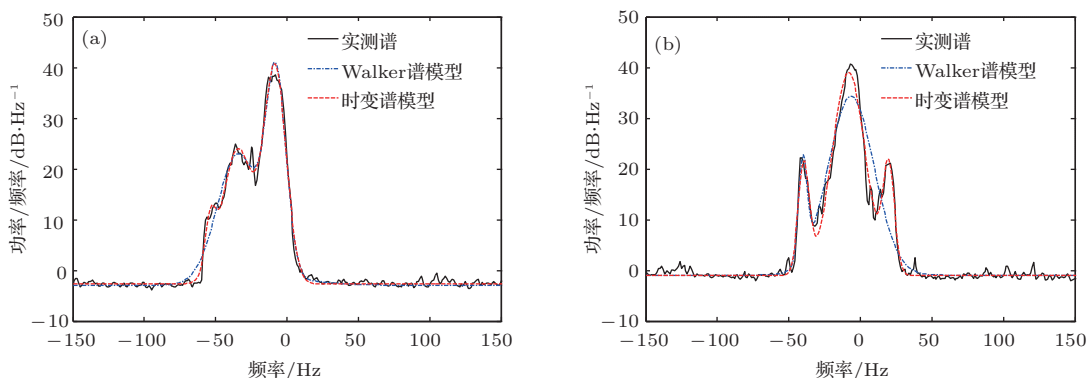


图6 岸基P波段海杂波平均多普勒谱建模效果 (a) 3级海况; (b) 4级海况
Fig. 6. The modeled long-time averaged doppler spectra at P band for (a) sea state 3 and (b) sea state 4.

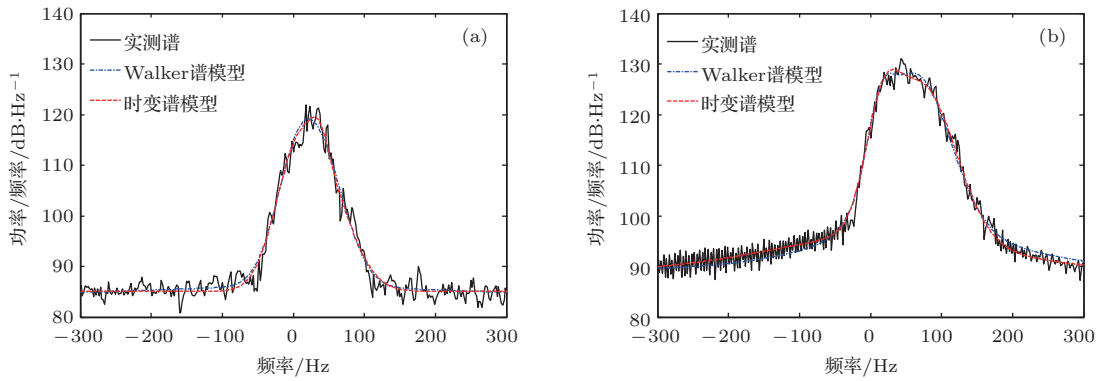


图7 岸基S波段海杂波平均多普勒谱建模效果 (a) 3级海况; (b) 4级海况

Fig. 7. The modeled long-time averaged doppler spectra at S band for (a) sea state 3 and (b) sea state 4.

表3列出了与图6和图7对应的两种谱模型在平均多普勒谱建模中的模型参数与定量的建模误差. 根据模型参数可以分析各个谱分量对总多普勒谱的贡献, 例如, 对于P波段3级海况下时变多普勒谱的建模结果而言, $I_{Bh} > I_W > I_S$ 说明海杂波数据中布拉格散射的贡献依次大于白冠散射和破碎波散射的贡献, $w_W > w_B > w_S$ 说明白冠散

射产生的谱展宽依次大于布拉格散射和破碎波散射产生的谱展宽. 对比建模误差可以看出, 时变谱模型的建模误差总体上小于Walker模型, 其中在P波段优势更为显著, 在S波段两者建模效果相当, 这是由两个波段平均谱的特征决定的, 与图6和图7结论一致.

表3 两种谱模型在平均谱建模中的建模参数与建模误差

Table 3. The parameters and RMS errors of the two spectrum models in modeling the long-time averaged doppler spectra of sea clutter.

谱模型	波段	海况	I_{Bh}/dB	I_W/dB	I_S/dB	w_B/Hz	w_W/Hz	w_S/Hz	f_B/Hz	f_G/Hz	$\Delta f_s/Hz$	建模误差 (RMS)/dB
Walker 模型	P	3级	37.9	1.2	25.1	10.0	40.2	20.5	-7.6	-34.3	—	2.17
		4级	35.3	19.8	0.1	22.8	4.3	29.8	-6.5	-40.2	—	3.7
	S	3级	20.1	1.5	20.1	44.4	248.8	48.3	3.2	44.3	—	1.36
		4级	31.2	7.3	10.9	68.7	195.5	25.7	12.6	63.1	—	1.15
时变多普勒谱模型	P	3级	41.9	26.6	9.7	10.9	15.3	5.1	-8.2	-34.3	19.5	1.67
		4级	39.9	21.6	20.7	16.4	5.5	5.7	-8.2	-39.6	19.8	2.12
	S	3级	13.8	23.2	4.0	42.1	57.1	15.9	0.0	36.4	1.0	1.19
		4级	15.9	6.8	30.2	32.8	220.4	66.6	15.6	12.4	60.7	0.85

5 结 论

本文在海杂波传统多普勒谱模型的基础上, 提出了一种时变多普勒谱模型. 通过对两个波段海杂波短时多普勒谱的建模验证, 表明时变谱模型能够更清晰地描述短时谱的各个谱分量, 建模精度优于Ward短时谱模型, 尤其体现在短时谱的观测时间较长的情况下. 在平均多普勒谱建模中, 当实测谱的结构体现为多峰, 形状较为复杂时, Walker平

均谱模型忽略掉了部分谱形状的细微结构, 而时变谱模型可以对整个谱形状较为准确地建模. 当实测平均谱的形状较为简单时, 两种谱模型性能基本一致.

参考文献

[1] Ward K D, Watts S 2010 *IET Radar, Sonar Navig.* **4** 146
 [2] Li D C, Shui P L 2016 *IET Radar, Sonar Navig.* **10** 699

- [3] Rosenberg L, Watts S 2017 *IET Radar, Sonar Navig.* **11** 1340
- [4] Pidgeon V W 1968 *J. Geophys. Res.* **73** 1333
- [5] Lee P H Y, Barter J D, Beach K L 1995 *IEE Proc. Radar, Sonar Navig.* **142** 252
- [6] Walker D 2000 *IEE Proc. Radar, Sonar Navig.* **147** 114
- [7] Rosenberg L 2014 *IEEE T. Aero. Elec. Sys.* **50** 406
- [8] Watts S, Rosenberg L, Bocquet S 2016 *IET Radar, Sonar Navig.* **10** 24
- [9] Watts S, Rosenberg L, Bocquet S 2016 *IET Radar, Sonar Navig.* **10** 32
- [10] Corretja V, Meslot V, Kemkemian S, Montigny R 2017 *Proceedings of the IEEE Radar Conference Seattle, WA, USA, May 8–12, 2017* p1046
- [11] Watts S, McDonald M, Rosenberg L 2015 *Proceedings of the IEEE Radar Conference Johannesburg, South Africa, October 27–30, 2015* p91
- [12] Jiang W Z, Yuan Y L, Wang Y H, Zhang Y M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 124213 (in Chinese) [姜文正, 袁业立, 王运华, 张彦敏 2012 物理学报 **61** 124213]
- [13] Walker D 2001 *IEE Proc. Radar, Sonar Navig.* **148** 73
- [14] Watts S 2012 *IEEE T. Aero. Elec. Sys.* **48** 3303
- [15] Miller R J, Dawber W N 2002 *Proceedings of the International Radar Conference Edinburgh, UK, October 15–17, 2002* p444
- [16] Ward K D, Tough R J A, Watts S 2013 *Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance* (2nd Ed.) (London: The Institution of Engineering and Technology)
- [17] Raynal A M, Doerry A W 2010 *Doppler Characteristics of Sea Clutter* (New Mexico: Sandia National Laboratories)
- [18] Duncan J R, Keller W C, Wright J W 1974 *Radio Sci.* **9** 809
- [19] Plant W J, Keller W C 1990 *J. Geophys. Res.* **95** 16299
- [20] Zhang Y M, Wang Y H, Zhao C F 2010 *Chin. Phys. B* **19** 084103
- [21] Zhang Y S, Zhang J P, Li X, Wu Z S 2014 *Chin. Phys. B* **23** 108402

A time-varying Doppler spectrum model of radar sea clutter based on different scattering mechanisms*

Zhang Jin-Peng^{1)2)†} Zhang Yu-Shi¹⁾ Li Qing-Liang¹⁾ Wu Jia-Ji²⁾

1) (National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

2) (School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 13 July 2017; revised manuscript received 6 September 2017)

Abstract

The Doppler spectrum modeling of the sea clutter is of great significance for using the Doppler radar to suppress the sea clutter and detect the target on sea surface. Taking into account the characteristics of the Doppler spectrum components corresponding to three scattering mechanisms, the Bragg, whitecap, and breaking-wave, we propose a time-varying Doppler spectrum model of radar sea clutter in this paper. The Doppler spectrum shifts and bandwidths of the three scattering mechanisms are considered respectively, and a Doppler shift of an added wave speed is introduced into this model. Because the spectrum intensity is defined as a random variable being a function of the measuring time of the sea clutter series, the model has the ability to model both the long-time averaged Doppler spectra and the short-time Doppler spectra. By modeling the short-time Doppler spectra and the long-time averaged Doppler spectra of the shore-based radar sea clutter measured in the China Yellow Sea at P and S bands, it is indicated that the proposed model has a higher precision than the conventional model, and especially, the modeling errors decrease significantly in the cases of the short-time Doppler spectra with long measuring time and the long-time averaged Doppler spectra with complex shapes.

Keywords: radar sea clutter, Doppler spectrum, modeling method

PACS: 41.20.Jb, 43.28.We

DOI: [10.7498/aps.67.20171612](https://doi.org/10.7498/aps.67.20171612)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61401342).

† Corresponding author. E-mail: zhjinpeng@hotmail.com