

海浪波谱仪微波散射模型*

Sea Surface Scattering Model for SWIM

储小青¹, 何宜军^{2**}

CHU Xiao-qing¹, HE Yi-jun²

(1. 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东广州 510301; 2. 南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏南京 210044)

(1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography (South China Sea Institute of Oceanology, CAS), Guangzhou, Guangdong, 510301, China; 2. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210044, China)

摘要:【目的】建立与观测数据相符的海浪波谱仪(SWIM)散射模型。【方法】利用 Kirchhoff 近似以及准镜面散射理论, 建立从海浪方向谱映射到海浪波谱仪后向散射截面(σ°)的散射模型, 并利用热带降雨测量卫星(TRMM)所搭载的降雨雷达(PR)提供的低入射角下的后向散射截面数据, 对模型进行检验。【结果】准镜面散射模型结合高阶 Gram-Charlier 级数型海表斜率概率密度函数, 模拟的雷达后向散射截面与入射角的关系在降雨雷达的 $0\sim 18^\circ$ 入射角范围内与实测数据一致。【结论】海浪波谱仪的信号散射可利用准镜面散射模型结合高阶 Gram-Charlier 级数型海表斜率概率密度函数来描述。

关键词: 海浪波谱仪 后向散射截面 准镜面散射

中图分类号: P733 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)03-0301-07

Abstract:【Objective】A sea surface scattering model was established in order to agree well with measurement data for SWIM (Surface Waves Investigation and Monitoring). 【Methods】The forward transfer function from sea surface directional wave spectrum to normalized radar cross section (NRCS, σ°) was developed based on Kirchhoff approximation and quasi-specular reflection theory. Precipitation radar (PR) on the Tropical Rainfall Mapping Mission (TRMM) provides NRCS at low incidence angles. The model is tested using measurements from PR. 【Results】By using the quasi-specular scattering theory, combined with Gram-Charlier expansion of probability density function of wave slopes to the forth order, the modeled NRCS agrees well with radar measurements from nadir to 18° . 【Conclusion】For SWIM, the sea surface scattering can be presented by quasi-specular scattering theory, combined with Gram-Charlier expansion of probability density function of wave slopes to the forth order.

Key words: SWIM, normalized radar cross section, quasi-specular scattering

收稿日期: 2015-05-08

作者简介: 储小青(1984-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事海洋遥感、海洋中小尺度现象、气候变化相关的研究。

* 国家自然科学基金项目(41076119), 江苏省自然科学基金项目(BK2011008), 江苏省高等教育优势学科项目和 2015 遥感青年科技人才创新项目资助。

** 通信作者: 何宜军(1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋遥感、物理海洋方面的研究, E-mail: yjhe@nuist.edu.cn.

0 引言

【研究意义】海浪波谱仪(SWIM)是新型的海浪信息探测雷达, 能提供全球全天时、近全天候的海浪测量, 有着广泛的应用前景。入射角范围的选择是它与目前其它微波传感器的主要区别之一。海浪波谱仪的 6 个波束入射角分别为 $0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ 和 10° 。在这样的小入射角范围内, 雷达接收的散射信号及方

式与目前常用的散射计、合成各孔径雷达(SAR)、X波段成像雷达和高度计有显著区别。而粗糙表面的电磁散射模型的建立是深入理解雷达信号所包含信息的基础和核心。【前人研究进展】在 20° 以上的中等入射角范围内,如散射计和SAR,其雷达信号散射模型的研究已比较成熟,其接受的信号主要是来自海面微尺度波的布拉格(Bragg)散射信号^[1~4];在 0° 入射角,如高度计,其接收的信号主要是海面的镜面反射^[5],不存在各向异性与不对称性,其模型也相对成熟。而 $0\sim 20^\circ$ 的小入射角下,由于缺少业务运行的星载微波雷达,其研究不多。Chu等^[6]通过分析后向散射截面NRCS随风向的变化,发现小入射角下NRCS存在各向异性与不对称性,并且其迎风、逆风不对称性与中等入射角下的情况刚好相反。Chu等^[7]还分析了小入射角下NRCS与海面风、浪特征参数的直接关系,并建立了一种由NRCS直接反演风速的新方法^[8]。【本研究切入点】 $0\sim 10^\circ$ 的入射角范围,海面对雷达信号的散射机制既不同于中等入射角(以Bragg散射为主的散射),也不同于天底点的散射(与方位向无关)。由于散射原理不同,导致探测机理不同,而探测机理不同,其反演算法也将不同于现有的星载微波传感器。因此,建立一个与实测数据相符的散射模型极为关键,而针对该问题的研究不多见。【拟解决的关键问题】利用电磁波散射理论,解决小入射角下粗糙表面的电磁散射问题,建立与实测数据相符的电磁波散射模型,并利用降雨雷达提供的后向散射截面数据对建立的模型进行验证。

1 数据

为了检验所建模型和分析其所适用的入射角范围,通过散射模型计算特定海况、特定雷达参数下的标准化后向散射截面(NRCS, σ°),并与该海况下雷达测量的NRCS比较。海况信息由浮标提供, NRCS由星载降雨雷达提供。

1.1 浮标数据

海表风和海浪信息来自浮标测量。所用的浮标数据来源于美国国家数据浮标中心(NDBC),其位置如图1。其中风信息为10 min一次采样的风矢量(风速、风向)数据。海浪信息包括有效波高、主波方向、主波周期、平均周期、风浪波高、风浪方向、风浪周期、涌浪波高、涌浪方向、涌浪周期、海浪一维波高谱和二维方向谱。其中一维谱频率范围为 $0.02\sim 0.485$ Hz,步长 0.0125 Hz,对于深水,其波长为 $6.6\text{ m}\sim 3.9\text{ km}$ 。

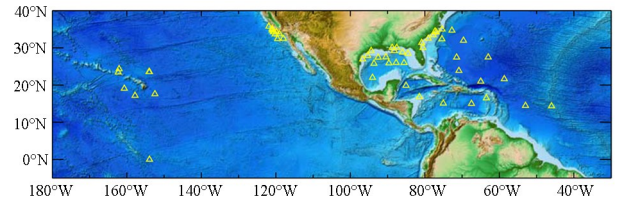


图1 浮标所在位置(黄色三角)

Fig. 1 Locations of the buoys used in the co-located dataset (yellow triangles)

底色为地形。The color shading shows the topography.

1.2 降雨雷达数据

热带降雨观测系统(TRMM)上的降雨雷达(PR)是目前唯一能提供小入射角下后向散射的星载主动微波雷达。PR的NRCS数据已经经过严格的内外定标。其测量值与位于日本的主动雷达校准器进行了比较,其期望的准确度为 1 dB ^[9,10]。与高度计测量值相比,Caudal等^[11]认为PR的后向散射截面比TOPEX大 1.2 dB ,而GEOSAT比TOPEX小 0.7 dB 。Tran等^[12]的研究表明PR数据(版本5)比JASON的值小 1.46 dB ,比ENVISAT测量值大 1.40 dB 。Liao等^[13,14]通过一系列位于墨尔本、佛罗里达的地基天气监测雷达(WSR)-88D与PR的测量值比较,表明雷达升轨前后,PR与WSR的测量值误差保持在 1 dB 范围之内。

本文所用雷达数据都是无雨条件下海洋上空的数据(数据可信度标志都为真),并对所用数据进行了质量控制。

2 准镜面散射

目前,粗糙表面的电磁散射问题的求解方法主要是将一些解析方法做一定的物理近似。物理光学中的Kirchhoff近似(又称切平面近似)将粗糙曲面用局部切平面代替,由Fresnel反射定律获得切平面上的感应总场,从而近似计算远区散射场。Kirchhoff近似要求粗糙面上任意位置的曲率半径足够大,而且由于未考虑遮挡效应和多次散射,要求粗糙面的均方根倾角大于入射和散射余角(擦地角)。根据物理光学,Kirchhoff近似法要求:

$$kR \cos^3\theta \gg 1, \quad (1)$$

其中 k 为雷达波数, R 为海面曲率半径, θ 为入射角。

海浪波谱仪入射角为 $0\sim 10^\circ$,且小入射角范围更容易满足(1)式的要求。采用这种简化假设之后,要得到解析解仍是相当困难,还需有附加的简化假设。Barrick^[5]推导了有限粗糙表面上的散射结果,认为在近天底点,大尺度波浪的准镜面散射占绝对优势,采用Kirchhoff近似之后,雷达的后向散射可表

示为

$$\sigma^\circ(\theta, \varphi) = \frac{|R(0)|^2 \pi}{\cos^4 \theta} \cdot p(z_x, z_y), \quad (2)$$

式中, θ 为入射角, φ 为方位向角度, $|R(0)|^2$ 为 Fresnel 反射系数, $p(z_x, z_y)$ 为海浪斜率在距离向分量 z_x 和方位向分量 z_y 的联合概率密度函数。

对于海浪斜率的概率密度函数的研究一直是热点。它不仅在此模型中是关键量, 它还影响着海-气界面的物理过程。目前常用的斜率分布经验函数是 Cox 和 Munk^[15~17] 利用海表在太阳光下的照片分析的结果。根据 Cox 和 Munk 的分析, 不考虑斜率分量之间的相互作用, 海浪斜率分布 p 可利用 Gram-Charlier 级数展开:

$$p = (2\pi\sigma_u\sigma_v)^{-1} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\xi^2 + \eta^2)\right\} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^{i+j} \frac{c_{ij}}{i!j!} H_i(\xi) H_j(\eta), \quad (3)$$

其中, 斜率分量 (z_x 和 z_y) 被迎风、侧风均方根斜率 (σ_u 和 σ_v) 标准化为 ξ 和 η 。 $H_n(x)$ 为 n 阶 Hermite 多项式, 满足:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot n!} \int_{-\infty}^{+\infty} H_n(x) H_m(x) e^{-x^2/2} dx = \begin{cases} 0, n \neq m, \\ 1, n = m, \end{cases} \quad (4)$$

P 满足标准化要求:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p \, dz_x \, dz_y = 1. \quad (5)$$

对于海浪斜率, 其均值为 0, 设方差分别为 σ_u^2 , σ_v^2 , 即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} z_x \cdot p \, dz_x \, dz_y = 0,$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} z_y \cdot p \, dz_x \, dz_y = 0, \quad (6)$$

$$\sigma_u^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} z_x^2 \cdot p \, dz_x \, dz_y, \sigma_v^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} z_y^2 \cdot p \, dz_x \, dz_y, \quad (7)$$

因此

$$1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p \, dz_x \, dz_y = \sigma_u \sigma_v \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p \, d\xi \, d\eta = c_{00}. \quad (8)$$

类似地, 由式(6)可得 $c_{10} = c_{01} = 0$, 由式(7)可得 $c_{20} = c_{02} = 0$ 。又由于海浪斜率是关于侧风方向对称的, 因此 η 的奇次方项系数为 0, 即 $c_{03} = c_{21} = c_{13} c_{31} = c_{11} = 0$ 。因此, 式(3)展开到四阶, 共 15 项, 简化后只剩下如下 6 项:

$$p = (2\pi\sigma_u\sigma_v)^{-1} \exp\left[-\frac{1}{2}(\xi^2 + \eta^2)\right] \left\{1 - \right.$$

$$\left. \frac{1}{2}c_{12}(\eta^2 - 1)\xi - \frac{1}{6}c_{30}(\xi^3 - 3\xi) + \frac{1}{24}c_{40}(\xi^4 - 6\xi^2 + 3) + \frac{1}{4}c_{22}(\xi^2 - 1)(\eta^2 - 1) + \frac{1}{24}c_{04}(\eta^4 - 6\eta^2 + 3) + \dots\right\}. \quad (9)$$

对应的各阶中心距为

$$\langle z_x \rangle = 0, \langle z_x^2 \rangle = \sigma_u^2, \langle z_x^3 \rangle = -c_{30}\sigma_u^3, \langle z_x^4 \rangle = (3 + c_{40})\sigma_u^4. \quad (10)$$

海浪斜率的偏度及峰度定义为

$$\mu_3 = \langle \xi^3 \rangle = -c_{30}, \mu_4 - 3 = \langle \xi^4 \rangle = c_{40}. \quad (11)$$

可以看出斜率概率密度函数中系数 c_{30} 表征了偏度, 系数 c_{40} 表征了峰度。

如果不考虑海面的偏度、峰度等高阶项, 式(9)简化为高斯函数:

$$p = (2\pi\sigma_u\sigma_v)^{-1} \exp\left[-\frac{1}{2}(\xi^2 + \eta^2)\right]. \quad (12)$$

结合式(2)和式(12), 对于斜率概率密度呈高斯型的海面, 有

$$\sigma^\circ(\theta, \varphi) = \frac{|R(0)|^2}{\cos^4 \theta} \cdot \frac{1}{2\sigma_u\sigma_v} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\tan\theta \cdot \cos\varphi}{\sigma_u}\right)^2 + \left(\frac{\tan\theta \cdot \sin\varphi}{\sigma_v}\right)^2\right]\right\} = \frac{|R(0)|^2}{2\sigma_u\sigma_v \cos^4 \theta} \cdot \exp\left\{-\frac{\tan^2\theta}{2}\left[\left(\frac{\cos\varphi}{\sigma_u}\right)^2 + \left(\frac{\sin\varphi}{\sigma_v}\right)^2\right]\right\}, \quad (13)$$

其中, φ 为方位向与风向的夹角。

本文定义观测方向 φ 的平均斜率方差为 σ_φ^2 , 满足下式:

$$\frac{1}{\sigma_\varphi^2} = \frac{\cos^2\varphi}{\sigma_u^2} + \frac{\sin^2\varphi}{\sigma_v^2}, \quad (14)$$

则(13)式变为

$$\sigma^\circ(\theta, \varphi) = \frac{|R(0)|^2}{2\sigma_u\sigma_v \cos^4 \theta} \cdot \exp\left[-\frac{\tan^2\theta}{2\sigma_\varphi^2}\right]. \quad (15)$$

垂直入射时的 Fresnel 反射系数 ($|R(0)|^2$) 依赖于相对介电常数, 而相对介电常数通常与海水温度、盐度、雷达波长、雷达极化方式等有关。对于水平极化的海浪波谱仅有

$$|R(\theta)|^2 = \frac{(\cos(\theta) - \eta_1)^2 + (\eta_2)^2}{(\cos(\theta) + \eta_1)^2 + (\eta_2)^2}. \quad (16)$$

参数 η_1, η_2 均为海水温度、盐度、雷达波长的函数。利用 Klein 和 Swift^[18] 给出的经验关系式可以计算得出, 在海水温度为 20℃, 盐度为 30 psu, Ku 波段、HH 极化 $|R(0)|^2$ 的理论值约为 0.61。

式(9)中的多个变量以及(13)式中迎风、侧风均方根斜率 (σ_u 和 σ_v) 都是海浪斜率的特征量。这些斜率特征量可利用海浪方向谱计算获得。设海浪局地

斜率的两正交分量分别为 z_x 和 z_y , 对应的斜率方差为 σ_x^2 和 σ_y^2 。根据海浪谱理论, σ_x^2 , σ_y^2 以及它们的一阶耦合矩可以由海浪的方向谱 $S(k_x, k_y)$ 计算获得

$$\sigma_x^2 = \iint k_x^2 S(k_x, k_y) dk_x dk_y, \quad (17)$$

$$\sigma_y^2 = \iint k_y^2 S(k_x, k_y) dk_x dk_y, \quad (18)$$

$$\sigma_{xy}^2 = \iint k_x k_y S(k_x, k_y) dk_x dk_y. \quad (19)$$

为满足(1)式要求, 局地海面曲率半径应足够大。即只有海浪的低频部分才满足 Kirchhoff 近似的要求, 才对准镜面散射导致的雷达后向散射截面有贡献。上式积分时波数有上限限制, 称为截断波数, 用 k_d 表示。利用海浪谱并结合(1)式可计算得到不同雷达波段的截断波数。

到此, 建立了从海浪谱前向映射到雷达后向散射截面的基于 Kirchhoff 近似的准镜面散射模型。

3 模型验证

通过两个方面进行验证。一方面, 选取风浪或涌浪个例, 要求其海况信息尽可能齐全, 并有海面波高谱信息。由于浮标测量的波高谱是不连续的, 而且频率范围较窄, 一般仅含有波长为数米以上的海浪频

谱, 缺少高频部分信息, 故本文采用与测量的海浪谱在低频部分相一致的全频段经验谱, 以补全高频部分信息。利用海况信息和雷达参数, 可计算不同入射角下的雷达后向散射截面。通过比较此海况下(同一时间同一区域)雷达测得的后向散射数据, 检验散射模型。另一方面, 统计特定风速下后向散射值随入射角的变化特征, 通过比较来检验散射模型与雷达实测值的一致性。

3.1 个例分析

3.1.1 风浪

随机选取一风浪观测数据, 例如 NDBC 浮标(图 2a)观测的风、浪参数为 10 m 处风速 11.2 m/s; 风向 168°; 风浪有效波高 2.0 m; 平均周期 5.2 s; 风浪过零点周期 6.2 s。涌浪参数: 涌浪波高 0 m; 波高频谱见图 2b。为计算海浪斜率参数, 需要波数在 0~ k_d 范围内的频谱, 因此选择风速为 11.2 m/s, 无因次风区长度 10000, 风向 168° 的 KKM 谱^[19] 来计算海浪参数。相对于早期的波浪谱模型, KKM 经验谱模型主要在小尺度部分进行了更精确的测量和拟合, 而大尺度部分基本与 Jonswap 谱^[20] 相同。从图 2b 中可以看出, KKM 经验谱与浮标所测基本一致。图 2a 中红色三角为浮标所在位置, 周边带颜色的圆点为雷

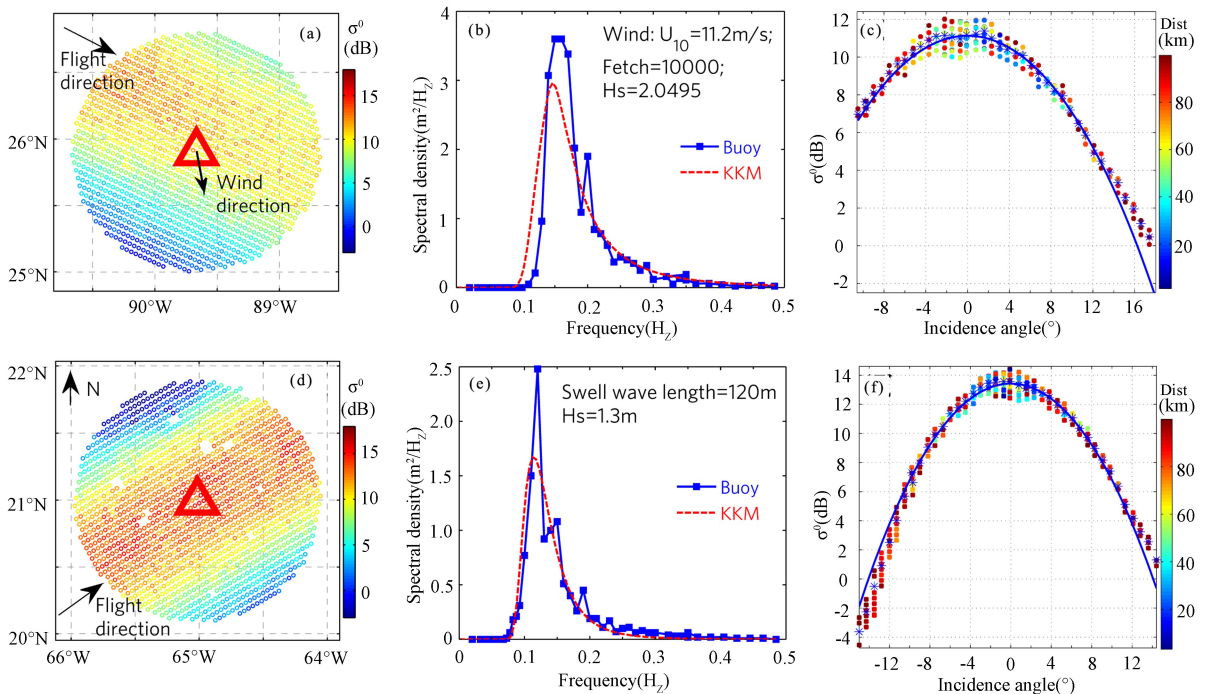


图 2 (a, d) 验证所用的雷达 NRCS 数据(带颜色的圆点, 其中颜色表示 NRCS 大小)以及与之匹配的浮标所在位置(红色三角); (b, e) 浮标测量的有限频段海浪谱(蓝色)与 KKM 经验谱(红色); (c, f) 散射模型与雷达 NRCS 比较。

Fig. 2 (a, d) Locations of PR NRCS measurements (colored circles) and co-located buoys (red triangles). (b, e) Wave spectra from buoy measurements (blue lines) and KKM (red lines). (c, f) Modeled (blue lines) and PR measured (colored dots) NRCS. (c, f) 图中带颜色的圆点为降雨雷达实测数据, 其颜色代表海面雷达测量点与所匹配浮标之间的距离, 蓝色星点为同一入射角的 NRCS 平均值, 蓝色实线为模型值。(a, b, c) 为风浪个例; (d, e, f) 为涌浪个例。

The color shows the distance between PR NRCS measurements and co-located buoy. Blue stars show the mean NRCS in the same incidence angle.

达 NRCS 测量点, NRCS 大小用颜色标示。匹配半径为 100 km。

利用 KMM 经验谱模型和理论截断波数, 计算得 $\sigma_a^2 = 0.027$, $\sigma_c^2 = 0.018$, $\sigma_t^2 = 0.045$, 风向 168° , 雷达方位角为 26° (正入射角) 和 206° (负入射角)。采用高斯斜率分布假设结合准镜面散射模型计算得到该方向的雷达散射截面与雷达实测值比较见图 2c。计算过程中, 由于反射率 $|R(0)|^2$ 与多个海水参数有关(式(16)), 不能准确获得, 因此用 0° 的雷达后向散射截面对模型值进行了标准化。

比较雷达 NRCS 测量值与模型预测值(图 2c), 可以看出, 在 $-8.5 \sim 10^\circ$ 的入射角范围内, 两者吻合很好, 但在 12° 以上, 模型预测值低于测量值。这说明对于此风浪个例情况, 高斯斜率分布假设结合准镜面散射模型适用于 12° 以下。

3.1.2 涌浪

NDBC 浮标(图 2d)观测的风浪参数为 5 m 处风速 2.1 m/s ; 风向 119° ; 风浪有效波高 0.4 m ; 风浪周期 3.8 s 。涌浪参数: 周期 8.3 s , 有效波高 1.3 m 。总的有效波高 1.3 m , 平均周期 6.2 s 。故此时主要为涌浪, 波高频谱见图 2e。选取涌浪波有效波高 1.3 m , 波长 120 m 的经验涌浪谱。浮标的频谱与涌浪经验谱的比较见图 2e。从图中看, 经验谱与浮标测得的海浪谱比较吻合。采用风浪实例同样的方法, 计算得模型值并与雷达观测值比较(图 2f)。可以看出, 在 $\pm 10^\circ$ 以内, 两者吻合很好; 但值得注意的是, 在 $-14^\circ \sim -10^\circ$, 模型值高于测量值, 而在 10° 以上, 模型预测值低于测量值。这说明对于此涌浪个例情况, 高斯斜率分布假设结合准镜面散射模型仅适用于 $\pm 10^\circ$ 以内。 10° 以上, 降雨雷达测得的 NRCS 出现了正、负入射角下的不对称性, 说明海面有效斜率方差具有顺风、逆风差异, 因此海面斜率的概率密度函数已经不是高斯型, 而具有一定的偏度。在此涌浪海况下, 此偏度导致的 NRCS 差异在 10° 以上已较明显, 不能忽略。

3.2 统计特征比较

利用大量匹配数据, 图 3 给出了雷达测得的 NRCS 在不同风速下随入射角的变化。为了检验准镜面散射模型, 图 3a 给出用准镜面散射模型结合高斯斜率概率密度函数拟合 NRCS 与雷达入射角的关系。可以看出, 除了特别小的风速外, 在 $0 \sim 10^\circ$ 左右的范围内, 观测值和模型值吻合很好。但是随着入射角的继续增大, 模型值比实测值偏小, 表明有其他散射的贡献, 或许高斯型斜率概率密度函数不准确。为了更加清晰的显示模型可适用的入射角范围, 在 $0 \sim$

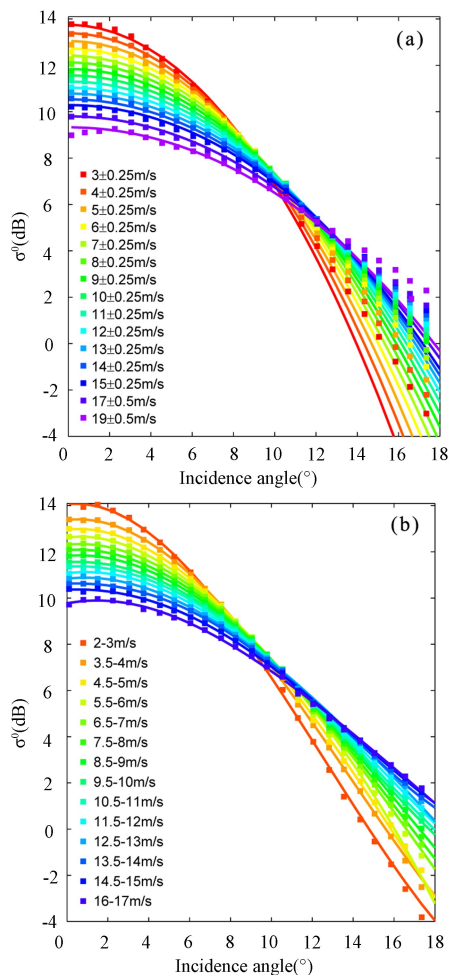


图 3 雷达 σ^0 在不同风速下与入射角的关系

Fig. 3 Mean values of binned PR σ^0 (colored dots) and modeled σ^0 (colored lines) as functions of incidence angle for different wind speeds

图中带颜色的方点为降雨雷达实测的 NRCS, 带颜色的实线为准镜面散射模型拟合曲线, 计算海面斜率概率分布假设为(a)高斯斜率分布, (b)四阶 Gram-Charlier 级数型。图中不同的颜色代表不同的风速。

For modeled σ^0 , the probability density function of wave slopes that we used is (a) Gaussian function (b) Gram-Charlier expansion series to the fourth order. Different wind speeds are showed in different colors.

6° 范围内, 用模型来拟合雷达观测值, 并将拟合函数外延到大入射角, 用吻合程度来判断模型所适用的入射角范围。图 4 的不同子图显示的是在特定风速范围内拟合的结果。可以看出, 6 m/s 以上的风速下, 能用准镜面散射模型结合高斯斜率分布拟合雷达 NRCS 的入射角范围是 $0 \sim 10^\circ$ 左右。大约 8 m/s 以上的风速下, 入射角范围可扩展到 $0 \sim 12^\circ$, 但是 14° 以上, 拟合值偏小, 说明其他散射机制或者斜率分布中高阶项已不能被近似忽略掉。而由 3.1.2 的涌浪个例可知, 斜率分布中偏度导致的 NRCS 差异在 10°

以上已较明显,不能忽略。因此,本文利用展开到四阶的 Gram-Charlier 级数结合准镜面散射模型拟合 NRCS 与雷达入射角的关系,结果见图 3b。可以看出,除了特别小的风速外,在整个 $0\sim 18^\circ$ 的范围内,模型值与观测值吻合得很好。因此,准镜面散射模型,结合带偏度和峰度的 Gram-Charlier 级数型海浪斜率概率密度函数,能在 $0\sim 18^\circ$ 范围内描述海浪对雷达的微波散射。

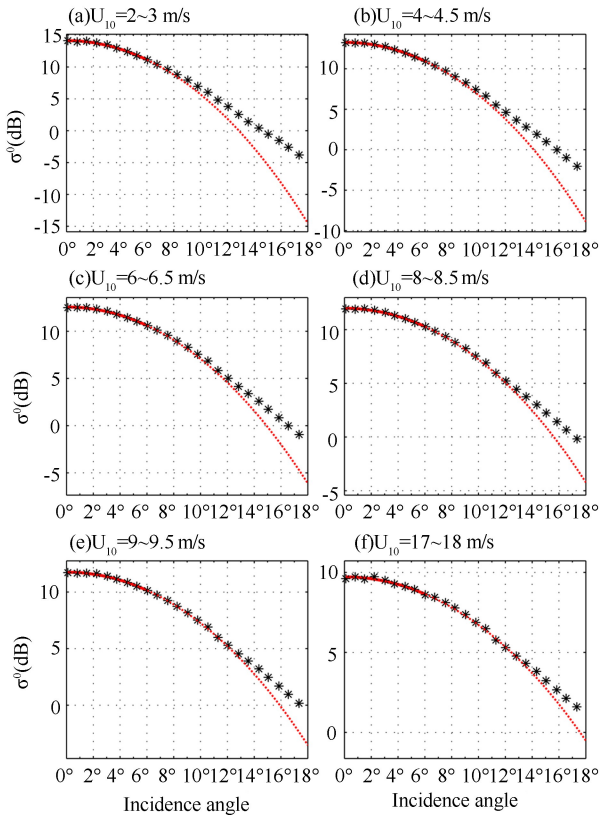


图 4 雷达 σ^0 在不同风速范围内与入射角的关系

Fig. 4 Mean values of binned PR σ^0 (black stars) as functions of incidence angle at $\pm 0.1^\circ$ for different wind speeds

图中黑色星点为雷达测量值在 $\pm 0.1^\circ$ 内的平均值,红色实线为 $0\sim 6^\circ$ 拟合理论模型(准镜面散射模型结合高斯斜率分布),红色虚线表示了拟合模型外延到 6° 以上的结果。

Red solid lines are the fitting values of quasi-specular scattering model, assuming the probability density function of wave slopes is Gaussian function. Red dotted lines are the extrapolate values of fitted functions above 6° .

4 结论

本文利用电磁波散射理论,建立从海浪方向谱映射到海浪波谱仪后向散射截面的散射模型,并利用降雨雷达提供的低入射角下的后向散射截面数据,对建立的模型进行检验。结果表明,准镜面散射模型,结合带偏度和峰度的 Gram-Charlier 级数型海浪斜率

概率密度函数,能在 $0\sim 18^\circ$ 范围内描述海浪对雷达的微波散射。而对于目前较常用的高斯型斜率概率密度函数的假设,只能用在较小入射角下,如 8° 以下。尽管如此,一般认为天底点到 6° 左右的入射角范围内, NRCS 由准镜面散射贡献。而从验证结果可以看出,除了特别小的风速 (< 3 m/s) 外,不论海浪斜率是高斯型,还是带偏度和峰度的 Gram-Charlier 级数型,都能在 $0\sim 8^\circ$ 的范围内利用准镜面散射模型再现雷达 σ^0 观测值。

参考文献:

- [1] Wright J W. Backscattering from capillary waves with application to sea clutter[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, 14(6): 749-754.
- [2] Valenzuela G. Theories for the interaction of electromagnetic and ocean wave—a review[J]. Boundary Layer Meteorology, 1978, 13: 61-85.
- [3] Plant W J. A 2-scale model of short wind-generated waves and scatterometry[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 1986, 91(C9): 735-749.
- [4] Donelan M A, Pierson W J. Radar scattering and equilibrium ranges in wind-generated waves with application to scatterometry[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 1987, 92(C5): 4971-5029.
- [5] Barrick D E. Rough surface scattering based on specular point theory[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1968, 16(4): 449-454.
- [6] Chu X Q, He Y J, Chen G X. Asymmetry and anisotropy of microwave backscatter at low incidence angles[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(10): 4014-4024.
- [7] Chu X Q, He Y J, Karaev V Y. Relationships between Ku-band radar backscatter and integrated wind and wave parameters at low incidence angles[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(11): 4599-4609.
- [8] Chu X Q, He Y J, Chen G X. A new algorithm for wind speed at low incidence angles using TRMM precipitation radar data[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010, 58: 4162-4165.
- [9] Center E O. TRMM Data Users Handbook[M]. NASA, Earth Observation Center: National Space Development Agency of Japan, 2001.
- [10] Kummerow C, Simpson J, Thiele O, et al. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit[J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39(12): 1965-1982.
- [11] Caudal G, Dinnat E, Boutin J. Absolute calibration of

- radar altimeters: Consistency with electromagnetic modeling [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(6): 771-781.
- [12] Tran N, Zanife O Z, Chapron B, et al. Absolute calibration of Jason-1 and Envisat altimeter Ku-band radar cross sections from cross comparison with TRMM precipitation radar measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(9): 1389-1402.
- [13] Liao L, Meneghini R. Changes in the TRMM version-5 and version-6 precipitation radar products due to orbit boost [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2009, 87: 93-107.
- [14] Liao L, Meneghini R. Validation of TRMM precipitation radar through comparison of its multiyear measurements with ground-based radar [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(4): 804-817.
- [15] Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the suns glitter [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(11): 838-850.
- [16] Cox C, Munk W. Statistics of the sea surface derived from sun glitter [J]. *Journal of Marine Research*, 1954, 13(2): 198-227.
- [17] Cox C, Munk W. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter [J]. *Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography*, 1956, 6(9): 401-488.
- [18] Klein L A, Swift C T. Improved model for dielectric-constant of sea-water at microwave-frequencies [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1977, 25(1): 104-111.
- [19] Karaev V, Kanevsky M, Meshkov E. The effect of sea surface slicks on the Doppler spectrum width of a backscattered microwave signal [J]. *Sensors*, 2008, 8(6): 3780-3801.
- [20] Hasselmann K, Barnett T, Bouws E, et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) [J]. *Dtsch Hydrogr Z Suppl A*, 1973, 8(12): 289-300.

(责任编辑:尹 闯)

(上接第 293 页 Continue from page 293)

- [14] 环境保护部环境应急指挥领导小组办公室. 环境应急管理概论 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
Environmental Emergency Command Leading Group Office, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. *Introduction to Environmental Emergency Management* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
- [15] 国家质量技术监督局. GB18218—2009 危险化学品重大危险源识别 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
State Bureau of Quality Technical Supervision. *GB18218—2009 Hazardous Chemicals Major Hazard Identification* [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [16] 张治华, 徐建华, 韩贵锋. 生态敏感区划分指标体系研究——以北部湾(广西)经济区为例 [J]. *中国东西部合作研究*, 2007, 4: 89-96.
Zhang Z H, Xu J H, Han G F. Study on index system ecologically sensitive zoning: Beibu Gulf Economic Zone (Guangxi) for example [J]. *The Working Papers of RCEWCC*, 2007, 4: 89-96.
- [17] 国家环境保护总局. GB3097—1997 海水水质标准 [S]. 北京: 环境科学出版社, 1998.
State Environmental Protection Administration. *GB3097—1997 Sea Water Quality Standard* [S]. Beijing: Environmental Science Press, 1998.
- [18] 吕康. 重点危险源环境风险评价及分级方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
Lv K. Study on the Environment Risk Assessment and Grade Method for Major Hazard Installations [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.

(责任编辑:陆 雁)