

叶小敏, 林明森, 宋清涛, 等. 复合雷达后向散射模型与合成孔径雷达、散射计和高度计海面雷达后向散射观测的比较分析[J]. 海洋学报, 2019, 41(7): 123–135, doi:10.3969/j.issn.0253–4193.2019.07.011

Ye Xiaomin, Lin Mingsen, Song Qingtao, et al. Comparisons of composite radar backscattering model and sea surface radar backscatter from synthetic aperture radar, scatterometer and altimeter[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(7): 123–135, doi:10.3969/j.issn.0253–4193.2019.07.011

复合雷达后向散射模型与合成孔径雷达、散射计和高度计海面雷达后向散射观测的比较分析

叶小敏^{1,2}, 林明森^{1,2,5}, 宋清涛^{1,2*}, 廖菲³, 梁超^{1,2}, 周旋⁴

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 国家海洋局空间海洋遥感与应用研究重点实验室, 北京 100081; 3. 广州市气象台, 广东广州 511430; 4. 北京 5111 信箱, 北京 100094; 5. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 海洋微波散射模型相比于以经验统计建立的地球物理模式函数具有不受特定微波频率限制的优势。组合布拉格散射模型和几何光学模型形成了复合雷达后向散射模型。利用南海北部气象浮标 2014 年海面风速风向实测值作为散射模型输入, 分别比较了复合雷达后向散射模型与 RADARSAT-2 卫星 C 波段 SAR、HY-2A 卫星 Ku 波段微波散射计的海面后向散射系数, 偏差分别为 (-0.22 ± 1.88) dB (SAR)、 (0.33 ± 2.71) dB (散射计 VV 极化) 和 (-1.35 ± 2.88) dB (散射计 HH 极化); 以美国浮标数据中心 (NDBC) 浮标 2011 年 10 月 1 日至 2014 年 9 月 30 日共 3 年的海面风速、风向实测值作为散射模型输入, 分别比较了复合雷达后向散射模型与 Jason-2、HY-2A 卫星 Ku 波段高度计海面后向散射系数, 偏差分别为 (1.01 ± 1.15) dB 和 (1.12 ± 1.29) dB。中等入射角和垂直入射下的卫星传感器后向散射系数观测值与复合雷达后向散射模型模拟值比较, 具有不同的偏差, 但具有相同的海面风速检验精度, 均方根误差小于 1.71 m/s。结果表明, 复合雷达后向散射模型可模拟计算星载 SAR、散射计和高度计观测条件下的海面雷达后向散射系数, 且与 CMOD5、NSCAT-2、高度计业务化海面风速反演的地球物理模式函数的计算结果具有一致性; 复合雷达后向散射模型可用于微波遥感器的定标与检验、海面雷达后向散射的模拟。

关键词: 雷达后向散射模型; 合成孔径雷达; 散射计; 高度计

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

文章编号: 0253–4193(2019)07–0123–13

1 引言

布拉格(Bragg)散射是海面微波散射的主要机制之一, 以此散射机制可建立海面风场与微波遥感后向散射系数间的定量关系。然而目前海面风场业务化遥感探测所采用的模型是以经验统计方法建立的地球物理模式函数(Geophysical Model Function, GMF),

如 C 波段微波散射计的 CMOD-IFR2^[1]、CMOD5^[2]、Ku 波段的 NSCAT-2^[3] 等。地球模式函数不仅应用于微波散射计, 也可用于近海风场的合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)反演^[4–6]。除地球物理模式函数外, 以微波散射理论为基础的物理模型也是海洋遥感机理研究和海面风场反演的热点^[7–17], 微波散射理论模型具有明确的物理含义, 也可用于海面风

收稿日期: 2017–04–24; 修订日期: 2018–04–26。

基金项目: 国家自然科学基金(41876211, 41506206, 41876204, 41476152, 41276019); 广东省省级科技计划项目(2013B020200013); 国家重点研发计划(2016YFC1401000); 国家自然科学基金委员会–山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(U1406404)。

作者简介: 叶小敏(1983—), 男, 江西省九江市人, 博士, 副研究员, 主要从事海洋遥感应用研究。E-mail: yxm@mail.nsoas.org.cn

* 通信作者: 宋清涛(1971—), 男, 辽宁省丹东市人, 博士, 研究员, 主要从事海洋遥感与边界层物理研究。E-mail: qsong@mail.nsoas.org.cn

场的反演^[18-22],但其主要优势是它在海洋与大气现象研究中具有广泛的适用性,如射流^[23]、亚中尺度涡^[24]、海上降雨^[25-27]等。布拉格散射模型仅适用于中等入射角,而几何光学模型可应用于小入射角的情形。本文将介绍组合布拉格模型和几何光学模型的复合雷达后向散射模型,使之适用于小至中等入射角,并利用它和地球物理模式函数分别计算浮标实测海面风速风向条件下的后向散射系数,再同星载 SAR、微波散射计(中等入射角)和雷达高度计(垂直入射)的海面后向散射系数观测进行对比分析,以探讨分析复合散射模型在卫星微波遥感中的适用性。

2 复合雷达后向散射模型介绍

复合雷达后向散射模型是布拉格散射模型和几何光学模型的组合。以布拉格散射为基础的双尺度模型认为小波(与入射的电磁波波长相当的微尺度波)叠加在大波(大尺度波)上,海面局地的散射均为小波对入射雷达波的布拉格散射,长波通过其倾斜波面调节小波,改变局地布拉格散射的局地入射角^[5,7,10-11,16-17]。布拉格散射的后向散射可表示为:

$$\sigma_{opq} = 16\pi k^4 \cos^4 \theta |g_{pq}(\theta)|^2 W(2k \sin \theta, \varphi), \quad (1)$$

式中, k 为雷达波数; θ 为雷达波入射角; W 为海面波浪的波数谱; φ 为波向(相对于海面风); $2k \sin \theta$ 为发生布拉格共振的海面波波数; 下标 p 和 q 表示极化(即 V 或 H 极化)。对于同极化, g_{pp} 的表示式为:

$$g_{HH}(\theta) = \frac{\varepsilon_r - 1}{[\cos \theta + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta}]^2}, \quad (2)$$

$$g_{VV}(\theta) = \frac{(\varepsilon_r - 1) [\varepsilon_r (1 + \sin^2 \theta) - \sin^2 \theta]}{[\varepsilon_r \cos \theta + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta}]^2}, \quad (3)$$

式中, ε_r 为海水相对复介电常数,为温度和盐度的函数^[28]。双尺度模型下,同极化的海面局地归一化散射截面可表示为:

$$\sigma_{0VV} = 16\pi k^4 \cos^4 \theta_i \left| g_{VV}(\theta_i) \left(\frac{\alpha \cos \delta}{\alpha_i} \right) + g_{HH}(\theta_i) \left(\frac{\sin \delta}{\alpha_i} \right) \right|^2 \times \quad (4)$$

$$W(K_{Bx}, K_{By}),$$

$$\sigma_{0HH} = 16\pi k^4 \cos^4 \theta_i \left| g_{HH}(\theta_i) \left(\frac{\alpha \cos \delta}{\alpha_i} \right) + g_{VV}(\theta_i) \left(\frac{\sin \delta}{\alpha_i} \right) \right|^2 \times \quad (5)$$

$$W(K_{Bx}, K_{By}),$$

式中,布拉格共振波数的两分量分别为 $K_{Bx} = 2k\alpha$, $K_{By} = 2k\gamma \sin \delta$; $\theta_i = \cos^{-1} [\cos(\theta + \psi) \cos \delta]$ 为雷达波局地入射角; $\alpha_i = \sin \theta_i$; $\alpha = \sin(\theta + \psi)$; $\gamma = \cos(\theta + \psi)$; 其中 ψ 和 δ 分别为 x 和 y 方向海面坡面的倾角(x - z 平面为电磁波入射波所在平面, y 垂直于 x - z 平面)。考虑所有长波坡度的

情况,则归一化雷达后向散射系数可表示为:

$$\sigma_{0pp}(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{0pp}(\theta_i) P_{\theta}(Zx', Zy') dZx dZy, \quad (6)$$

$$P_{\theta}(Zx', Zy') = (1 + Zx \tan \theta) P(Zx', Zy'), \quad (7)$$

式中, Zx' 、 Zy' 、 Zx 、 Zy 分别为 x' 、 y' 、 x 和 y 方向上的海面坡度(长波斜率), $Zx = \tan \psi$, $Zy = \tan \delta$; x' 平行于风向, y' 垂直于风向; $P(Zx', Zy')$ 为海面坡度联合概率密度函数; Zx 和 Zy 与 Zx' 和 Zy' 的转换关系为:

$$Zx' = Zx \cos \phi + Zy \sin \phi, \quad (8a)$$

$$Zy' = Zy \cos \phi - Zx \sin \phi. \quad (8b)$$

沿垂直海面方向观测的海面坡度概率密度函数 $P(Zx', Zy')$ 的表达式为^[29]:

$$P(Zx', Zy') = \frac{1}{2\pi\sigma_u\sigma_c} \exp\left(-\frac{Zx'^2}{2\sigma_u^2} - \frac{Zy'^2}{2\sigma_c^2}\right) \times \left[1 - \frac{C_{21}}{2} \left(\frac{Zy'^2}{\sigma_c^2} - 1 \right) \frac{Zx'}{\sigma_u} - \frac{C_{03}}{6} \left(\frac{Zx'^3}{\sigma_u^3} - \frac{3Zx'}{\sigma_u} \right) + \frac{C_{40}}{24} \left(\frac{Zy'^4}{\sigma_c^4} - 6 \frac{Zy'^2}{\sigma_c^2} + 3 \right) + \frac{C_{22}}{4} \left(\frac{Zy'^2}{\sigma_c^2} - 1 \right) \times \left(\frac{Zx'^2}{\sigma_u^2} - 1 \right) + \frac{C_{04}}{24} \left(\frac{Zx'^4}{\sigma_u^4} - 6 \frac{Zx'^2}{\sigma_u^2} + 3 \right) \right], \quad (9)$$

式中, $C_{40} = 0.4$, $C_{22} = 0.1$, $C_{04} = 0.2$, $C_{21} = -0.11U_{10}/14$, $C_{03} = -0.42U_{10}/14$, $\sigma_u^2 = 0.005 + 0.78 \times 10^{-3}U_{12.5}$, $\sigma_c^2 = 0.003 + 0.84 \times 10^{-3}U_{12.5}$, U_{10} 和 $U_{12.5}$ 分别为海面 10 m 高和 12.5 m 高处的风速。海面 10 m 高处海面风速大小(即通常所谓的海面风速)和海面不同高度处风速可利用如下关系进行换算^[30]:

$$\frac{U_z}{U_{10}} = \frac{\ln\left(\frac{z}{0.0016}\right)}{8.7403}, \quad (10)$$

式中, U_z 为海面高度 z 处的风速大小。

对于小入射角雷达波的后向散射,镜面反射(而非布拉格散射)占主要贡献, Kirchoff 近似的几何光学模型的表示式为:

$$\sigma_{0GO}(\theta) = \frac{|R(0)|^2}{2\sigma_u^2\sigma_c^2} \sec^4 \theta \exp\left(\frac{-\tan^2 \theta}{2\sigma_u^2}\right), \quad (11)$$

式中, σ_u^2 和 σ_c^2 分别为顺风向和侧风向海面粗糙度的均方坡度。 R 为菲涅耳反射系数,垂直入射的菲涅耳发射系数对于 HH 和 VV 极化均相同,其表达式为:

$$|R(0)|^2 = \frac{|1 - 2\sqrt{\varepsilon_r} + \varepsilon_r|}{|1 + 2\sqrt{\varepsilon_r} + \varepsilon_r|}. \quad (12)$$

在应用复合雷达后向散射模型的过程中,当局地雷达入射角小于 10° 时,用小入射角的几何光学后向散射模型计算式(11)代替公式(4)和(5)代入公式(6)计算后向散射系数。对于小入射角的阈值在不同研究中有不同的数值^[11-12,17],这里采用 Hwang 等^[17]选定的阈值,即设定小于 10° 的入射角时,假定公式(11)表示的镜面反射占主要贡献。

海面局地归一化散射截面计算式(4)和式(5)中的海浪波数谱 $W(K_{Bx}, K_{By})$ 用方向谱 $[S(K_B, \varphi_B) + S(K_B, \varphi_B - \pi)]/2$ 代替^[17], 其中 $K_B = 2k \sin \theta_i$ 为布拉格波数, φ_B 为布拉格波矢的方向, $S(K, \varphi)$ 为二维海面波浪方向谱, φ 为相对于风向的波矢方向。本文的复合雷达后向散射模型选用 Elfouhaily 海浪谱^[31]。Elfouhaily 海浪谱具体表达形式见文献^[31], 其二维波数-方向谱是风速、方向(相对于风向的角度)的函数。Elfouhaily 海浪谱的典型特征是在谱的所有波长范围内突出了风浪之间的海气相互摩擦作用过程, 它可有效地应用于微波散射模型中^[16, 31]。

3 模型验证与分析

3.1 与地球物理模式函数比较分析

复合雷达后向散射模型综合考虑了小入射角镜面反射的几何光学模型和布拉格散射的双尺度散射模型, 理论上适用于所有微波频段的雷达后向散射。在特定的微波波段, 海面风场和雷达后向散射系数的关系可用地球物理模式函数表示, 如 C 波段的 CMOD4^[32]、CMOD-IFR2^[1]、CMOD5^[2]等; Ku 波段的 NSCAT-2^[3]等。目前, 在 Ku 波段和 C 波段均发展了较新的地球物理模式函数, 如 NSCAT-4、CMOD7^[33]等。为了便于分析, 选用 HY-2A 卫星微波散射计业务化运行采用的 NSCAT-2 作为 Ku 波段对比的地球物理模式函数; 选用在南海北部已被验证可用于 C 波段 SAR 风场反演的地球物理模式函数——CMOD5^[6], 作为 C 波段对比的地球物理模式函数。图 1 为复合雷达后向散射模型与 CMOD5、NSCAT-2 地球模式函数模拟的海面后向散射系数及比较关系。

由图 1 海面后向散射系数随相对风向角度的变化曲线可见:(1)在 C 波段(5.4 GHz), 雷达波入射角设定为 35°, 海面风速为 10 m/s 的条件下, 复合雷达后向散射模型和 CMOD5 地球物理模式函数计算的后向散射系数接近, 对于 VV 极化下的后向散射系数, 其在顺风(逆风)时两模型计算的后向散射系数差异最大, 为 1.2 dB(相同入射角下, 相当于 1.5 m/s 风速差异引起的散射系数变化), 对于 HH 极化的后向散射系数, 在侧风条件下两模型计算的后向散射系数差异最大, 为 1.1 dB。图 1 中展示的 CMOD5 模式函数 HH 极化散射系数是通过 CMOD5 模式函数 VV 极化散射系数乘以 Thompson 等^[34]的极化比函数获得。(2)在 Ku 波段(13.4 GHz), 雷达波入射角设定为 35°, 海面风速为 10 m/s 的条件下, 复合雷达后向散射模型和 NSCAT-2 地球物理模式函数计算的 VV、HH 极化后向散射系数的最大差异值均发生在侧风向, 其中 VV 极化后向散射系数的最大差异值为 1.3 dB, HH 极化的后向散射系数最大差异值为 1.5 dB(相当于 1.8 m/s 风速差异引起的散射系数变化)。在 C 波段和 Ku 波段, 10 m/s 大小的海面风速, 35°的中等大小入射角条件下, 复合雷达后向散射模型和海洋遥感地球物理函数计算的后向散射系数差异较小, 最大差异为 Ku 波段的 HH 极化计算值, 其值仅为 1.5 dB, 即对应的风速差不超过 1.8 m/s。由以上一定条件下复合雷达后向散射模型与 CMOD5 和 NSCAT-2 地球物理模式函数比较分析可见, 复合雷达后向散射模型可模拟计算一定条件下的海面微波雷达后向散射系数。

3.2 与卫星观测数据比较分析

为进一步评价复合雷达散射模型在典型卫星遥

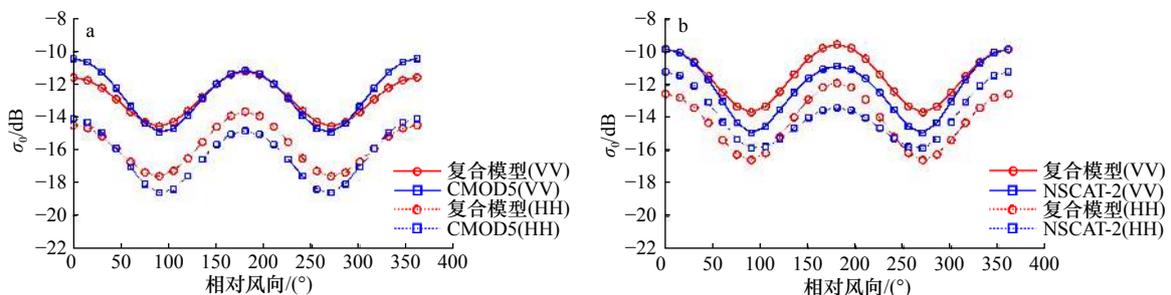


图 1 复合雷达后向散射模型与 CMOD5、NSCAT-2 地球物理模式函数的海面后向散射系数比较曲线

Fig. 1 The comparisons of sea surface normalized radar cross sections (NRCSs) of composite radar backscattering model with GMFs of CMOD5 and NSCAT-2

a. C 波段(5.4 GHz); b. Ku 波段(13.4 GHz)。海面风速为 10 m/s, 雷达波入射角为 35°, CMOD5 的 HH 极化后向散射系数由 VV 极化散射系数乘以 Thompson 等^[34]的极化比函数得到

a. C-band (5.4 GHz); b. Ku-Band (13.4 GHz). Sea surface wind speed at 10 m/s, incidence angle at 35°, NRCSs in HH polarization are calculated by the ones in VV polarization multiplied by polarization function of Thompson et al^[34]

传感器观测条件下的适用性和准确度,采用实测海面风速和风向值,通过复合雷达后向散射模型计算海面雷达后向散射系数,分别与 SAR、微波散射计(中等入射角)和雷达高度计(垂直入射)等微波载荷进行比较分析,其中南海北部(广东沿海)的气象浮标实测海面风数据用于与 SAR 和散射计的比较分析,美国国家浮标数据中心(National Data Buoy Center, NDBC)实测数据用于与雷达高度计的比较分析。

3.2.1 数据资料介绍

对复合雷达散射模型与 SAR、微波散射计观测值进行比较分析所选海区位于南海北部,采用的现场观测数据为分布于其范围内的 3 个业务气象浮标,分别位于茂名(编号: 59765)、汕头(编号: 59515)和汕尾(编号: 59506)临近海域,其海面风速和风向测量数据每 20 min 提供一个 2 min 平均的海面风速和风向数据,利用公式(10)将不同浮标高度下的风速值转换至 10 m 高处的海面风速,这些海面风实测数据具有业务化海洋气象的数据质量^[35]。除海面风速风向外,该浮标还同步观测有效波高、海面温度等海洋参数。浮标数据与卫星观测数据进行时间匹配时,用线性插值的方法插值获得卫星观测时刻的海面风速和风向。3 个业务气象浮标中,汕尾浮标离岸约 20 km,其余两浮标离岸均为 100 km 以上;汕尾浮标所处位置水深约 20 m,茂名浮标和汕头浮标水深分别约为 50 m 和 120 m(图 2)。基于汕尾浮标离岸距离近、水深浅的原因,不适合用于散射计数据的匹配比较,仅利用其对 SAR 数据匹配。

SAR 图像资料来自于加拿大 RADARSAR-2 卫星,工作于 C 波段(5.405 GHz)^[36]。所用 SAR 图像均为宽幅扫描模式,极化方式为 VV 或 HH,空间分辨率

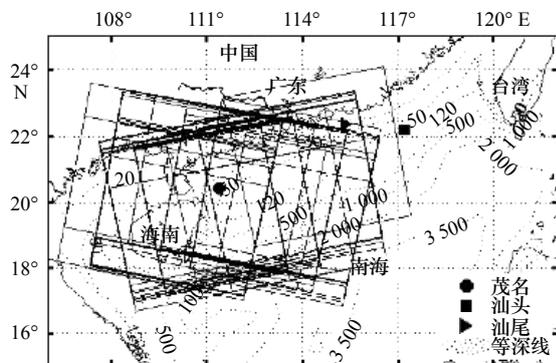


图 2 气象浮标位置、SAR 图像覆盖范围及南海北部水深情况(水深单位: m)

Fig. 2 Locations of meteorological buoys, SAR images coverage and bathymetric charts of the northern of South China Sea (unit: m)

为 100 m,刈幅宽度为 500 km,雷达波入射角范围在 20°~49°之间。受 SAR 图像资料数量限制, SAR 仅可与茂名和汕尾浮标进行时空匹配(观测时间同步、卫星观测范围覆盖浮标点)。剔除锋面、降雨等强海洋与大气过程的 SAR 图像,共匹配了 52 景 SAR 图像(其中 VV 极化 51 景, HH 极化 1 景), SAR 数据成像于 2013 年 4 月 4 日至 2015 年 4 月 18 日的时间范围内,其中 2013 年 9 景, 2014 年 41 景, 2015 年 2 景。图 2 同时绘出了 52 景 SAR 图像的覆盖范围。

微波散射计数据来源于 HY-2A 卫星微波散射计。该微波散射计工作于 Ku 频段(13.256 GHz),采用笔形圆锥扫描方式,刈幅宽度为 1 700 km(VV 极化)或 1 350 km(HH 极化),雷达波入射角为 41°(VV 极化)或 48°(HH 极化)^[37-39]。

对于复合雷达后向散射模型在垂直入射(即入射角为 0°)条件下与卫星观测的比较,则采用美国国家航空航天局(NASA)和法国空间中心(CNES)联合发射的 Jason-2 卫星高度计、中国 HY-2A 卫星雷达高度计 Ku 波段(13.6 GHz)后向散射系数为卫星观测数据来源。比较分析所用的现场观测数据选用美国国家浮标数据中心数据,分布于北美沿海、墨西哥湾和东北太平洋海域。

3.2.2 与 RADARSAT-2 卫星 SAR 观测的对比结果

当浮标与 SAR 匹配后,通过定标公式计算得到 SAR 各像素点的后向散射系数^[40]。以浮标位置为中心取半径为 5 km(直径 10 km)的所有 SAR 像素点的后向散射系数进行平均作为 SAR 观测值^[17]。气象浮标海面风速风向通过其时间序列数据线性插值至 SAR 观测时刻获得。采用浮标的海面风速、风向、SAR 雷达波入射角、方位角等信息,通过复合雷达后向散射模型公式(2)至式(11)计算该条件下 C 波段海面雷达后向散射系数。

图 3a 为 52 景 RADARSAT-2 卫星 SAR 图像与复合雷达后向散射模型计算的后向散射系数对比散点图,图中每一个散点表示一景 SAR 图像的后向散射系数与模型的对比数据。图 3a 的对比结果显示,复合雷达后向散射模型计算的 C 波段后向散射系数与 SAR 图像实际观测值存在一定差异,两者偏差为 (-0.22 ± 1.88) dB,均方根误差为 1.88 dB;两者存在高线性相关性,相关系数为 0.95;在后向散射系数较大的一端,复合雷达后向散射模型的计算值较 SAR 观测值偏大,在后向散射系数较小的一端,复合雷达后向散射模型的计算值较 SAR 观测值偏小。分析后向散射系数偏差 $\Delta\sigma_0$ ($\Delta\sigma_0 = \sigma_{0\text{模型}} - \sigma_{0\text{SAR}}$) 与观测时刻的浮

标有效波高、海面温度、风速、相对风向(相对 SAR 方位向的风向)、雷达波入射角的关系发现,

$\Delta\sigma_0$ 与雷达波入射角有高相关性(图4)。

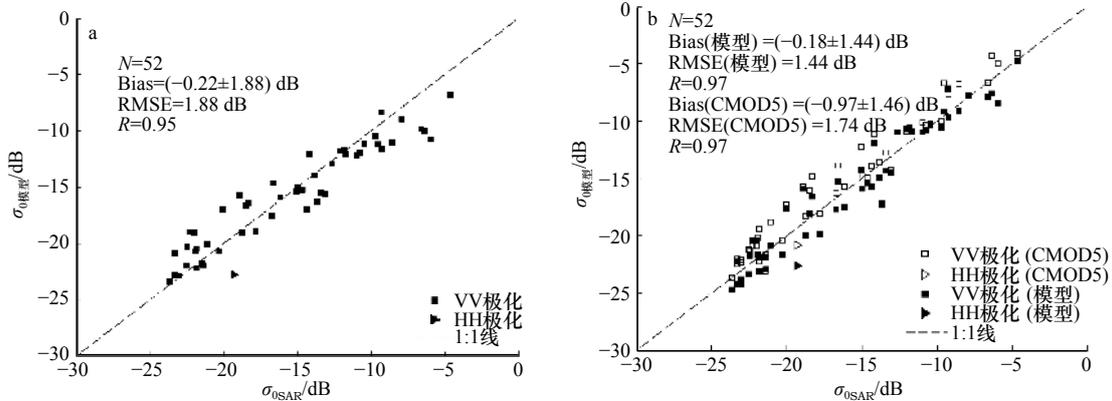


图3 复合雷达后向散射模型、CMOD5地球物理模式函数和修正后的复合散射模型与SAR图像后向散射系数对比
Fig. 3 Comparisons of NRCSs between composite radar backscattering model, CMOD5 GMF, revised composite scattering model and SAR image

a. 复合雷达后向散射模型; b. CMOD5地球物理模式函数、修正后的复合散射模型。复合雷达后向散射模型的输入条件采用C波段、RADARSAT-2卫星SAR的雷达波入射角、方位角和浮标实测风速风向; 每一个散点表示一景SAR图像与模型的对比数据; 数据时间分布于2013年4月4日至2015年4月18日

a. Composite radar backscattering model; b. CMOD5 GMF, revised composite scattering model. The incidence angles and azimuths for composite radar backscattering model are the same as that of RADARSAT-2/SAR at C band, the wind speeds and directions are the same as buoy measurements; every scatter point represents one matching data of one SAR image; the SAR images are imaged in the time period from April 4, 2013 to April 18, 2015

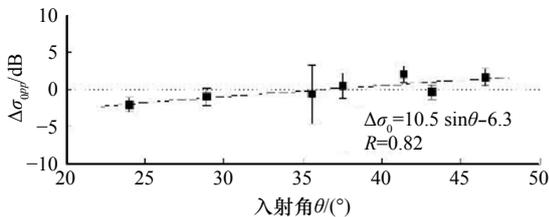


图4 复合雷达后向散射模型与SAR后向散射系数的偏差 $\Delta\sigma_0$ 随雷达波入射角的变化
Fig. 4 The NRCSs bias between composite radar backscattering model and SAR versus radar wave incidences

实数据点和误差棒分别为不同入射角下 $\Delta\sigma_0$ 的均值和标准差, 直线为 $\Delta\sigma_0$ 随入射角变化的拟合直线
The solid data points and error bars represent the mean value and standard deviation of $\Delta\sigma_0$ at different incidence, respectively; the straight line represents the fitting relationship between $\Delta\sigma_0$ and incidences

由于与SAR比对匹配的浮标仅为固定的茂名或汕尾浮标, 卫星对地观测存在重复轨道观测, 因此对比点的雷达波入射角主要分布在几个离散的固定入射角。对主要的雷达波入射角下的 $\Delta\sigma_0$ 进行平均并求其标准差。各入射角下的 $\Delta\sigma_0$ 均值(标准差)随入射角变化情况见图4。对 $\Delta\sigma_0$ 与雷达波入射角的变化进行最小二乘拟合, 获得拟合关系式为:

$$\Delta\sigma_0 = 10.5 \sin\theta - 6.3, \quad (13)$$

拟合的线性相关系数 $R=0.82$ 。

利用式(13)对复合雷达后向散射模型计算的后向散射系数进行修正后, 再与RADARSAT-2卫星SAR图像观测值进行比较, 其偏差则为 (-0.18 ± 1.44) dB; 均方根误差为1.44 dB; 线性相关系数为0.97。经过后向散射系数修正后, 模型计算值与SAR的观测值更加接近, 其结果和CMOD5地球物理模式函数的计算值与SAR观测值比较的结果接近, 为了便于与未修正的结果对比, 该散点图绘制于图3b。利用CMOD5地球物理模式函数计算C波段后向散射系数时采用复合雷达后向散射模型相同的输入参数, 即采用匹配点的SAR雷达波入射角、方位角、浮标的实测风速和风向; HH极化的后向散射系数由相同条件下的VV极化后向散射系数乘以极化比函数计算得到。CMOD5的后向散射系数计算值与SAR观测值的偏差为 (0.97 ± 1.46) dB, 均方根误差为1.74 dB, 线性相关系数为0.97。与SAR观测数据进行对比分析时, 计算的偏差没有区分极化方式, HH极化的数据很少, 仅1景, 因此上述结果可认为仅代表VV极化SAR的对比结果。对比图3a和图3b的比较分析结果可见, 复合雷达后向散射模型可有效地模拟计算获得C波段SAR观测条件下的后向散射系数。

3.2.3 与HY-2A卫星微波散射计观测的对比结果

采用茂名和汕头2个气象浮标与HY-2A微波散射计数据进行时空匹配:获取浮标所在位置的HY-2A微波散射计的观测风矢量面元(空间大小为 $25\text{ km}\times 25\text{ km}$)内的后向散射系数、雷达波入射角、方位角和观测时间。同一个观测单元内,可存在多个入射角和后向散射系数。对浮标观测数据进行时间上的线性插值,获得散射计观测时刻的海面风速和风向实测值。最终获得匹配数据量分别为1824组(VV极化)和2215组(HH极化)。以散射计的观测几何参数、浮标实测风速和风向作为输入,利用复合雷达后向散射模型,计算Ku波段(13.256 GHz)的后向散射系数。复合雷达后向散射模型计算的后向散射系数与HY-2A微波散射计后向散射系数观测值的对比结果为:VV极化的偏差为 $(0.33\pm 2.71)\text{ dB}$,均方根误差为

2.73 dB ,线性相关系数为0.85;HH极化的偏差为 $(-1.35\pm 2.88)\text{ dB}$,均方根误差为 3.18 dB ,线性相关系数为0.83(图5a,图5b)。

由图5a和图5b展示的结果可见,复合雷达后向散射模型与HY-2A微波散射计在VV极化情形下,两者后向散射系数偏差较小,平均偏差仅为 0.33 dB ;而对于HH极化,复合雷达后向散射模型计算的后向散射系数较HY-2A微波散射计偏小,达 -1.35 dB ,但两者相关系数高达0.83(VV极化的相关系数为0.85)。为了进一步评价复合雷达后向散射模型与HY-2A卫星微波散射计后向散射系数的比较结果,以相同的散射计观测参数(雷达波入射角和方位角)、浮标实测海面风速和风向作为输入,利用NSCAT-2地球物理模式函数计算获得的Ku波段后向散射系数与HY-2A卫星微波散射计后向散射系数进行比较(图5c,

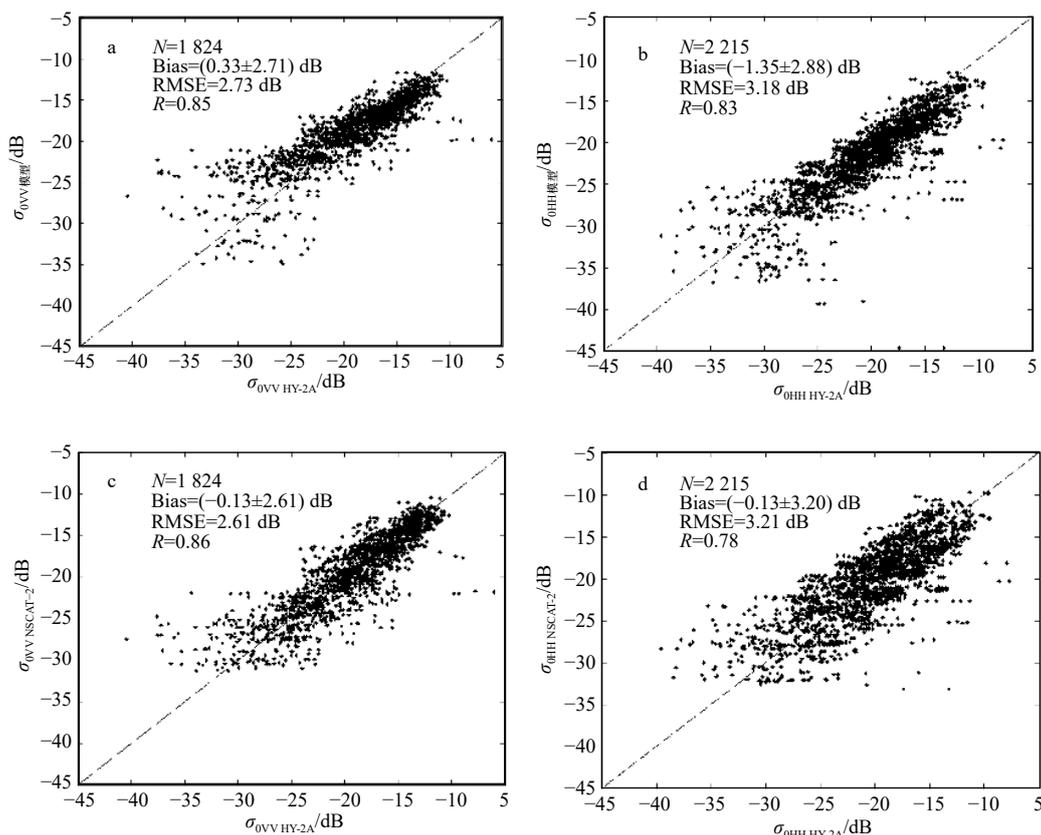


图5 复合雷达后向散射模型、NSCAT-2地球物理模式函数计算的后向散射系数与HY-2A卫星微波散射计观测值的对比散点图

Fig. 5 Comparisons of NRCSs between composite radar backscattering model, NSCAT-2 GMF and microwave scatterometer on board HY-2A satellite

a.复合雷达后向散射模型, VV极化; b.复合雷达后向散射模型, HH极化; c.NSCAT-2, VV极化; d.NSCAT-2, HH极化。Ku波段, NSCAT-2的输入条件采用HY-2A卫星散射计雷达波入射角、方位角和浮标实测风速风向;数据时间为2014年全年

a. Composite radar backscattering model, VV polarization; b. composite radar backscattering model, HH polarization; c. NSCAT-2, VV polarization; d. NSCAT-2, HH polarization. Ku-band, the incidence angles and azimuths for NSCAT-2 are the same as that of HY-2A scatterometer, the wind speeds and directions are the same as buoy measurements in the whole year of 2014

图 5d)。

NSCAT-2 地球物理模式函数计算的后向散射系数与 HY-2A 微波散射计后向散射系数观测值的比较结果为: VV 极化的偏差为 (-0.13 ± 2.61) dB, 均方根误差为 2.61 dB, 相关系数为 0.86; HH 极化的偏差为 (-0.13 ± 3.20) dB, 均方根误差为 3.21 dB, 相关系数为 0.78。由以上比较结果可见, 在 Ku 波段, 复合雷达后向散射模型和 NSCAT-2 地球物理模式函数具有基本一致的准确度(平均偏差、偏差的标准差、均方根误差); 对于 HH 极化, 复合雷达后向散射模型较 NSCAT-2 地球物理模式函数与 HY-2A 卫星微波散射计的实际观测值更具有有一致性, 即比较数据具有更高的线性相关系数。

由于用于匹配比较分析的 HY-2A 卫星微波散射计和浮标数据量较大, 按照月为时间单位, 对所获得的对比偏差分别进行时间序列分析, 偏差(含偏差的标准差)的时间序列见图 6。图 6a 中 VV 极化的两后向散射系数偏差时间序列的线性相关系数为 0.77; 对于 HH 极化, 两偏差时间序列的线性相关系数为 0.86, 见图 6b。图 6 的曲线也明显显示, 复合雷达后向散射模型和 NSCAT-2 模式函数相对于 HY-2A 散射计海面后向散射系数观测值偏差的时间变化趋势基本一致, 偏差的标准差(图 6 中误差棒的线段半长度)也表现基本一致的时间变化规律。该结果表明, 在模

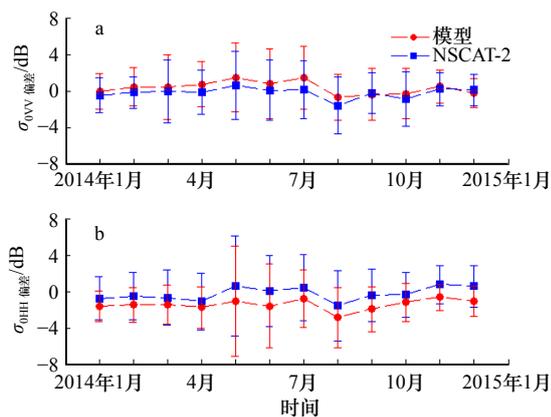


图 6 复合雷达后向散射模型、NSCAT-2 地球物理模式函数计算的海面后向散射系数与 HY-2A 卫星微波散射计观测值的偏差的时间变化曲线

Fig. 6 Time series of NRCSs bias between composite radar backscattering model, NSCAT GMF and HY-2A scatterometer

a. VV 极化, b. HH 极化。数据点代表每月的平均偏差, 误差棒代表偏差的标准差

a. VV polarization, b. HH polarization. Data point represents monthly mean bias, error bar represents the standard deviation of the monthly

biases

拟仿真 Ku 波段微波的海面后向散射系数时, 复合雷达后向散射模型与 NSCAT-2 地球物理模式函数具有一致性。

3.2.4 复合模型与 Jason-2、HY-2A 卫星雷达高度计观测的对比结果

高度计数据质量控制方法为: 删除陆地、冰上和降雨条件下的观测数据, 同时保证后向散射系数不高于 35 dB、有效波高处于 0~11 m 的范围内; 时空匹配方法为: 以浮标位置为中心, 选择离浮标 50 km 范围内的卫星观测点的平均值作为卫星观测值, 选择卫星过境浮标位置最近点 ± 30 min 的浮标实测值的平均值作为实测的海面风速和风向^[39,41]。选用的数据的时间跨度为 2011 年 10 月 1 日至 2014 年 9 月 30 日; 获得的匹配数据和 Ye 等^[41]的检验匹配数据集相同, Jason-2 卫星共获得 3 732 组有效匹配对比数据, HY-2 卫星共获得 3 375 组有效匹配对比数据。

比较分析前, 还需对 Jason-2 和 HY-2A 卫星雷达高度计后向散射系数进行校正处理。即对 Jason-2 和 HY-2A 卫星高度计 GDR/IGDR 数据产品“sigma0”记录值进行 -2.61 dB 的偏差值校正。这是因为 Chelton 和 McCabe^[42]、Witter 和 Chelton^[43]模型均是以 Geosat 卫星高度计散射系数建立的风速反演算法, 而 T/P 相对于 Geosat 卫星高度计有 -0.63 dB 的偏差^[44], Jason-1 相对于 T/P 的偏差为 -2.26 dB^[45], 而 Jason-2 相对于 Jason-1 的偏差为 0.28 dB^[46], HY-2A 和 Jason-2 卫星高度计采用相同的风速反演算法, 其散射系数已校正至同一基准上。

不同风速条件下, 卫星雷达高度计 Ku 波段后向散射系数与复合雷达后向散射模型、地球物理模式函数比较情况见图 7。图 7 展示的比较结果中, 除了复合雷达后向散射模型, 还选择了几何光学模型(即公式(11))、Chelton 和 McCabe^[42]的地球物理模式函数、Witter 和 Chelton^[43]的 T/P 卫星高度计海面风速业务化反演的地球物理模式函数以及 Young^[47]的高风速(>20 m/s)下地球物理模式函数。由图 7 的比较结果可见, Jason-2 卫星(图 7a)和 HY-2A 卫星(图 7b)的海面散射系数观测点基本分布于各散射模型和地球物理模式函数预测线附近; Chelton 和 McCabe^[42]地球物理模式函数与 Witter 和 Chelton^[43]地球物理模式函数之间的差别主要在高风速区间(>15 m/s), 他们与 Jason-2、HY-2 卫星高度计 Ku 波段的散射系数在风速为 3~15 m/s 的区间内符合较好; 而复合雷达后向散射模型和几何光学模型在低于 3 m/s 风速和高于 15 m/s 的高风速情况下与高度计后向散射系数观

测值符合较好。在高于 20 m/s 的高风速下,复合雷达后向散射模型与 Young^[47] 的高风速高度计风速反演算法最接近,Young^[47] 的高风速经验模型是利用模式预报与 Geosat 卫星高度计在热带风暴条件下通过经验拟合而得到。

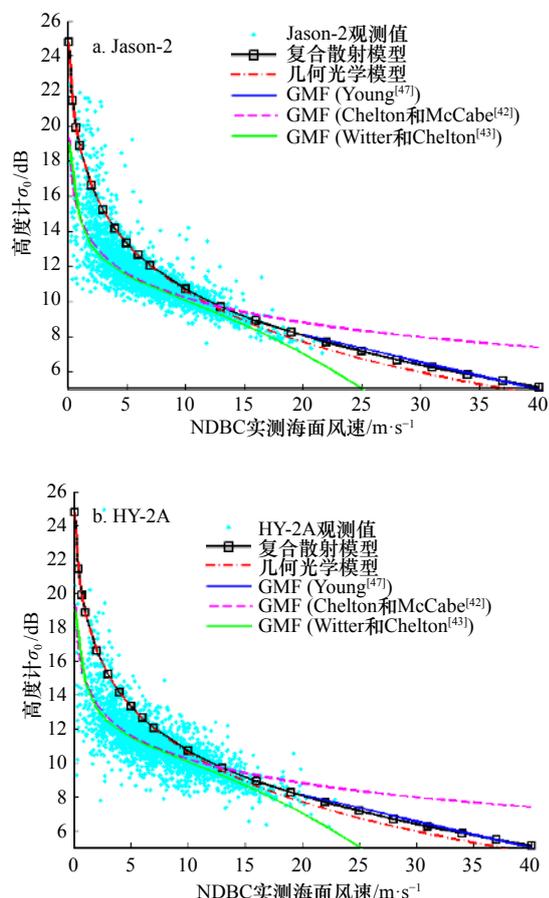


图7 卫星雷达高度计 Ku 波段后向散射系数与复合后向散射模型、地球物理模式函数的比较

Fig. 7 Comparisons of NRCSs between composite backscattering model, GMF and satellite radar altimeter at Ku-band

以时空匹配的 NDBC 浮标海面风速和风向为输入,分别计算 Ku 波段高度计观测条件(即垂直海面入射,入射角为 0°)下的复合雷达后向散射模型和 T/P 卫星高度计风速反演模型(Writter 和 Chelton^[43])的后向散射系数,它们与卫星高度计的后向散射系数观测值比较情况见图 8。

复合雷达后向散射模型 Ku 波段后向散射系数计算值与 Jason-2 卫星高度计观测值对比,偏差为 (1.01 ± 1.15) dB,均方根误差为 1.53 dB,线性相关系数为 0.82;Writter 和 Chelton^[43] 地球物理模式函数的计算值与 Jason-2 对比,偏差为 (-0.44 ± 1.00) dB,均方根误差为 1.09 dB,线性相关系数为 0.81。复合雷达后向

散射模型 Ku 波段后向散射系数计算值与 HY-2A 卫星高度计观测值对比,偏差为 (1.12 ± 1.29) dB,均方根误差为 1.71 dB,线性相关系数为 0.77;Writter 和 Chelton 地球物理模式函数计算值与 HY-2A 高度计对比,偏差为 (-0.24 ± 1.00) dB,均方根误差为 1.03 dB,线性相关系数为 0.76。从以上对比结果可见,Jason-2、HY-2A 卫星高度计 Ku 波段的海面后向散射系数与模型计算值均有具有较高的准确度和一致性。无论是利用 Jason-2 卫星还是 HY-2A 卫星对模型计算值精度进行评价检验,结果均显示复合雷达后向散射模型、Writter 和 Chelton 地球物理模式函数两者计算的后向散射系数差异较小,差异不超过 0.29 dB(复合雷达后向散射模型与 HY-2A 高度计后向散射系数偏差的标准差为 1.29 dB,Writter 和 Chelton 模型与 HY-2A 高度计后向散射系数偏差的标准差为 1.00 dB,两者差异为 0.29 dB)。图 8 还显示,Jason-2 卫星和 HY-2A 卫星对海面后向散射系数的观测结果基本一致,见图 8a 和图 8c、图 8b 和图 8d 之间对比统计量的数值。

4 讨论

以卫星微波遥感器的海面后向散射观测值作为真值,检验复合雷达后向散射模型雷达后向散射系数的计算准确性,这对卫星传感器后向散射系数的定标要求较高,因此同时采用成熟的,已被业务化应用的地球物理模式函数与卫星传感器观测值进行同步对比,以间接论证复合雷达后向散射模型与卫星传感器对比结果的可靠性。

复合雷达后向散射模型、地球物理模式函数在卫星传感器观测条件下的计算值与 SAR、微波散射计、雷达高度计观测值进行对比的统计结果见表 1,发现复合雷达后向散射模型与卫星雷达高度计的 Ku 波段后向散射系数观测值对比的均方根误差最小(Jason-2 为 1.53 dB, HY-2A 为 1.71 dB),与 HY-2 卫星 Ku 波段 HH 极化微波散射计的观测值对比的均方根误差最大(3.18 dB),但和 Ku 波段 NSCAT-2 地球物理模式函数的对比结果相当(3.21 dB)。尽管表 1 中各传感器后向散射系数观测值与复合雷达后向散射模型或相应的地球物理模式函数比较所获得的对比统计值有所差异,但其反演的海面风速产品均可达到应用需求指标,即均方根误差不超过 2 m/s。对匹配的 Jason-2 卫星高度计和 HY-2A 微波散射计的海面风速产品进行检验,其结果见图 9。

图 9 中 Jason-2 卫星高度计海面风速是相对 ND-

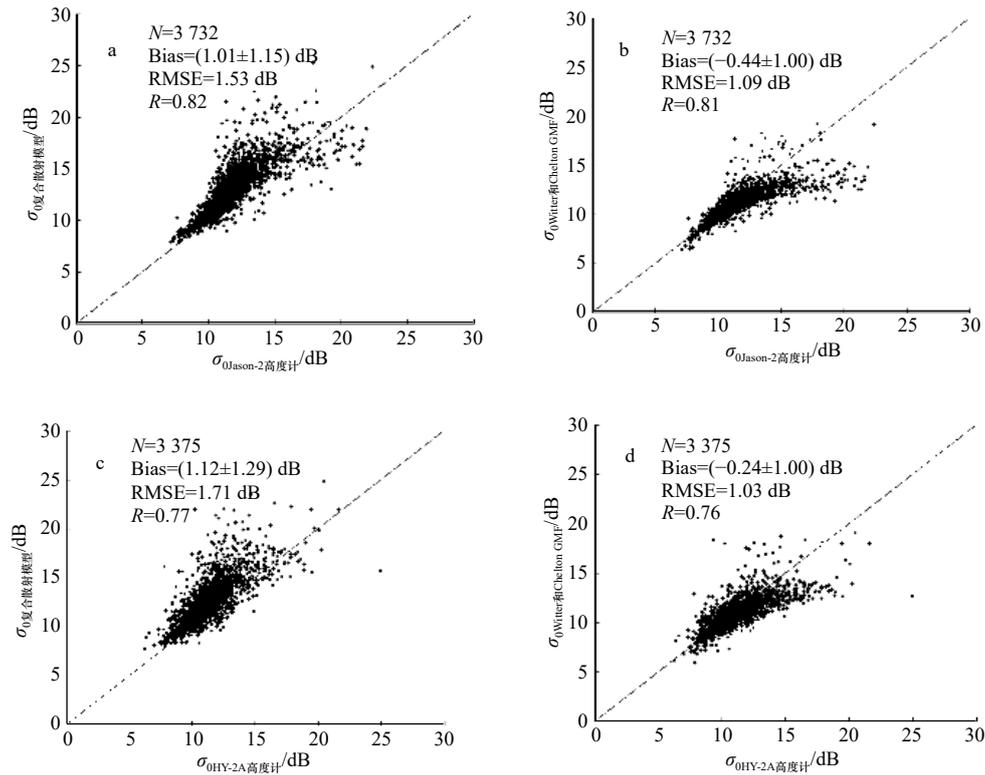


图8 模型计算值与 Jason-2、HY-2A 卫星雷达高度计后散射系数观测值对比散点图

Fig. 8 Comparisons of NRCSs between the model and Jason-2, HY-2A altimeter

a, c. 复合雷达后向散射模型; b, d. Writer 和 Chelton^[43] 地球物理模式函数。Ku 波段, 模型输入采用 NDBC 浮标的实测风速风向; 数据时间为 2011 年 10 月 1 日至 2014 年 9 月 30 日
 a, c. Composite radar backscattering model; b, d. Writer and Chelton^[43] GMF. Ku-band, the wind speeds and directions are the same as NDBC buoy measurements in the time period from October 1, 2011 to September 30, 2014

表 1 复合雷达后向散射模型与各卫星微波传感器观测对比结果

Tab. 1 Comparison results of composite radar backscattering model with satellite-borne microwave sensors

卫星	遥感器类型	波段(频率)	数据量	复合模型			地球物理模式函数(GMF)			GMF名称	实测海面风场来源
				偏差/dB	RMSE/dB	R	偏差/dB	RMSE/dB	R		
RADARSAT-2	合成孔径雷达	C波段 (5.405 GHz)	52(VV极化51, HH极化1)	-0.22±1.88	1.88	0.95	0.97±1.46	1.74	0.97	CMOD5	南海北部气象浮标
				-0.18±1.44*	1.44*	0.97*	-	-	-		
HY-2A	散射计	Ku波段 (13.256 GHz)	1 824(VV极化)	0.33±2.71	2.73	0.85	-0.13±2.61	2.61	0.86	NSCAT-2	南海北部气象浮标
			2 215(HH极化)	-1.35±2.88	3.18	0.83	-0.13±3.20	3.21	0.78		
Jason-2	高度计	Ku波段 (13.6 GHz)	3 732	1.01±1.15	1.53	0.82	-0.44±1.00	1.09	0.81	Writer和Chelton ^[43] ,	NDBC浮标
HY-2A	高度计	Ku波段 (13.58 GHz)	3 375	1.12±1.29	1.71	0.77	-0.24±1.00	1.03	0.76	T/P卫星高度计风速反演业务化算法	

注: *通过公式(14)校正后,与SAR的对比统计值。

BC 浮标 2011 年 10 月 1 日至 2014 年 9 月 30 日的检验结果; HY-2A 微波散射计海面风速是相对于南海北部气象浮标 2014 年全年的检验结果; Jason-2 高度计和 HY-2A 微波散射计的海面风速的均方根误差分别为 1.71 m/s 和 1.58 m/s, 均满足优于 2 m/s 的应用指

标, 且与相关研究结果相当, 如叶小敏等^[39] 利用 NDBC 浮标对 Jason-2 海面风速产品检验的均方根误差为 1.37 m/s; 穆博等^[48] 利用 NCEP 海面风场数据对 HY-2A 微波散射计海面风速检验的均方根误差为 1.64 m/s。需要说明的是图 9a 中, Jason-2 卫星高度计

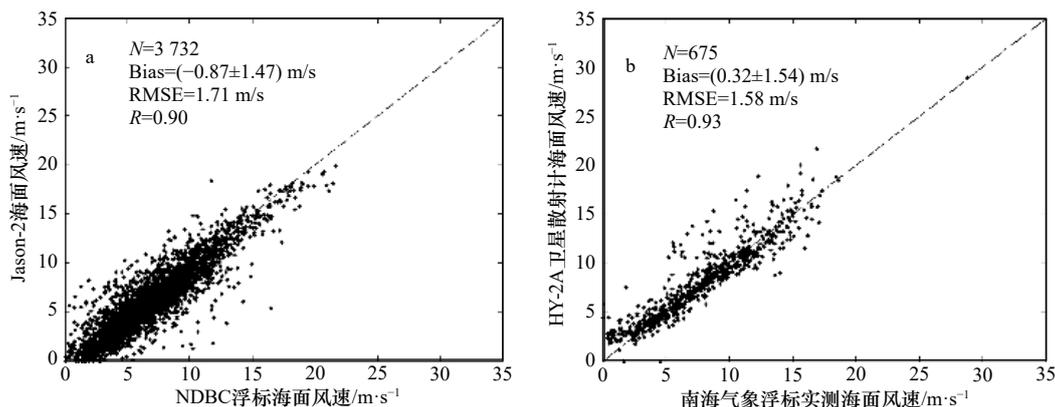


图9 卫星遥感海面风速产品真实性检验结果

Fig. 9 Validation results of sea surface wind speeds of satellite remote sensing products

a 为 Jason-2 卫星高度计, 利用 NDBC 浮标检验, 数据时间为 2011 年 10 月 1 日至 2014 年 9 月 30 日; b 为 HY-2A 卫星微波散射计, 利用南海北部气象浮标检验, 数据时间为 2014 年全年

a is Jason-2 validated against NDBC buoy measurements in the time period from October 1, 2011 to September 30, 2014; b is HY-2A scatterometer against meteorological buoy measurements located in the northern of South China Sea in the whole year of 2014

海面风速是根据其后向散射系数, 利用 Witter 和 Chelton 模型反演获得的。Jason-2 高度计 GDR 原始数据记录的海面风速是利用后向散射系数和有效波高双参数反演得到, 其检验的均方根误差为 1.46 m/s。由以上卫星遥感海面风速产品的真实性检验结果可见, 以上微波遥感器的海面雷达后向散射系数测量值是可靠的, 其与地球物理模式函数比较获得的偏差(含平均偏差和偏差的标准差)、均方根误差和线性相关系数等统计量的数值可作为参考值以评价复合雷达后向散射模型。又由表 1 中的统计数值可见, 复合雷达后向散射模型与卫星微波传感器、地球物理模式函数与卫星微波传感器后向散射系数对比的统计结果基本一致, 说明复合雷达后向散射模型可有效地仿真计算 C 波段 SAR、Ku 波段散射计和 Ku 波段高度计等各卫星微波传感器观测条件下的海面雷达后向散射系数。

复合雷达后向散射模型计算公式(4)和公式(5)采用的 Elfouhaily 海浪方向谱的方位函数采用的是顺风 and 逆风对称的表达式^[31], 因此固定入射角和风速条件下, 后向散射系数随相对风向(相对于雷达观测方位)的变化曲线顺风(相对风向为 0°)和逆风(相对风向为 180°)对称, 即顺风和逆风条件下的后向散射系数相等(图 1), 而地球物理模式函数(CMOD5 和 NSCAT-2 等)在顺风和逆风情况下, 计算的后向散射系数不相同。同时海浪谱模型也有一定的海况适用范围, 比如在高风速下波浪破碎、海流的影响时, 仅考虑风浪谱的复合散射模型将不再适用, 这即是处理 SAR 卫星数据时, 需剔除锋面、降雨等强海洋与大

气过程的 SAR 图像的原因。由此可见复合雷达后向散射模型中的海浪谱也是影响散射模型准确性的因素之一。

RASARSAT-2 卫星 C 波段 SAR 数据对复合雷达后向散射模型进行对比分析时, 两者偏差与雷达波入射角存在高相关性, 其偏差可拟合为雷达波入射角正弦函数的线性表达式, 而利用 CMOD5 地球物理模式函数与 SAR 进行相同方法的对比时, 其偏差不依赖于入射角(图 3)。出现该结果的原因还有待分析。

5 总结

布拉格散射模型和几何光学模型的组合形成了复合雷达后向散射模型。以南海北部气象浮标、NDBC 浮标等海面实测数据为基础, 通过与 RADARSAT-2 卫星 C 波段 SAR、HY-2A 卫星 Ku 波段微波散射计、Jason-2 和 HY-2A 卫星 Ku 波段雷达高度计等多种星载卫星遥感海面雷达后向散射系数测量值的定量比较分析, 显示复合雷达后向散射模型与卫星传感器的观测值基本一致。由于不同卫星传感器工作于不同的雷达波入射角条件下, 它们与复合雷达后向散射模型对比的偏差完全相等(高度计最小, 微波散射计最大), 但在该偏差水平下, 它们反演获得的海面风速的误差均满足小于 1.71 m/s 的精度。复合雷达后向散射模型和 CMOD5、NSCAT-2、T/P 高度计风速反演业务化算法等地球物理模式函数分别与卫星传感器对比分析时, 复合雷达后向散射模型与地球物理模式函数表现出基本一致的准确度。分析结果表明复合雷达后向散射模型预期可应用于星载 SAR、微波

散射计和高度计海面雷达后向散射系数的模拟仿真、定标与检验;也可以作为散射理论的基础,进一步研究海流、海上降雨的散射机理。

参考文献:

- [1] Quilfen Y, Chapron B, Elfouhaily T, et al. Observation of tropical cyclones by high-resolution scatterometry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C4): 7767-7786.
- [2] Hersbach H, Stoffelen A, Haan S. An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C3): 223-237.
- [3] Wentz F J, Smith D K. A model function for the ocean-normalized radar cross section at 14 GHz derived from NSCAT observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(C5): 11499-11514.
- [4] 杨劲松, 黄韦良, 周长宝, 等. 合成孔径雷达图像的近岸海面风场反演[J]. *遥感学报*, 2001, 5(1): 13-16.
Yang Jinsong, Huang Weigen, Zhou Changbao, et al. Coastal ocean surface wind retrieval from SAR imagery[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(1): 13-16.
- [5] 杨劲松. 合成孔径雷达海面风场、海浪和内波遥感技术[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2001.
Yang Jinsong. Remote sensing technology of sea surface wind field, sea wave and internal wave by Synthetic Aperture Radar[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2001.
- [6] Xu Qing, Lin Hui, Zheng Quanan, et al. Evaluation of ENVISAT ASAR data for sea surface wind retrieval in Hong Kong coastal waters of China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 27(4): 57-62.
- [7] Valenzuela G R. Depolarization of EM waves by slightly rough surfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 1967, 15(4): 552-557.
- [8] Valenzuela G R. Scattering of electromagnetic waves from a tilted slightly rough surface[J]. *Radio Science*, 1968, 3(11): 1057.
- [9] Chan H L, Fung A K. A theory of sea scatter at large incident angles[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(24): 3439-3444.
- [10] Fung A K, Lee K. A semi-empirical sea-spectrum model for scattering coefficient estimation[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1982, 7(4): 166-176.
- [11] Donelan M A, Pierson W J. Radar scattering and equilibrium ranges in wind-generated waves with application to scatterometry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(C5): 4971-5029.
- [12] 徐丰, 贾复. 适用于不同频率的微波海面散射计算方法[J]. *遥感技术与研究*, 1996, 11(3): 26-30.
Xu Feng, Jia Fu. A algorithm of sea surface radar scatter application to wide frequency band[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1996, 11(3): 26-30.
- [13] 徐丰, 贾复, 马丽娟. 海面微波散射与风生波短波谱[J]. *遥感学报*, 2000, 4(4): 251-255.
Xu Feng, Jia Fu, Ma Lijuan. Microwave backscatter over the sea surface and spectrum of short wind-generated waves[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(4): 251-255.
- [14] 郭立新, 王运华, 吴振森. 修正双尺度模型在非高斯海面散射中的应用[J]. *电波科学学报*, 2007, 22(2): 212-218.
Guo Lixin, Wang Yunhua, Wu Zhensen. Application of modified two-scale model for scattering from non-Gaussian sea surface[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, 22(2): 212-218.
- [15] Plant W J. A two-scale model of short wind-generated waves and scatterometry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(C9): 10735-10749.
- [16] Plant W J. A stochastic, multiscale model of microwave backscatter from the ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, 107(C9): 3-1.
- [17] Hwang P A, Zhang Biao, Toporkov J V, et al. Comparison of composite Bragg theory and quad-polarization radar backscatter from RADARSAT-2: With applications to wave breaking and high wind retrieval[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(C8): 246-255.
- [18] 喻亮, 丁晓松. 利用星载ERS-2 SAR进行长江口海面风场反演研究[J]. *信息与电子工程*, 2005, 3(3): 172-175.
Yu Liang, Ding Xiaosong. Ocean surface wind field retrieval of the Yangtze River outlet from spaceborne ERS-2 SAR Image[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2005, 3(3): 172-175.
- [19] Xu Qing, Lin Hui, Yin Xiaobin, et al. SAR measurement of ocean surface wind using a physics model[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International, 2008: I-420-I-423.
- [20] Lin Mingsen, Ye Xiaomin, Yuan Xinzhe. The first quantitative joint observation of typhoon by Chinese GF-3 SAR and HY-2A microwave scatterometer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(11): 1-3.
- [21] 魏士俨, 杨晟, 许德伟. 星载微波散射计海面风场与海洋环境噪声的相关特性分析[J]. *海洋学报*, 2017, 39(5): 61-67.
Wei Shiyan, Yang Sheng, Xu Dewei. Correlation analysis of satellite-borne microwave scatterometer wind and ocean ambient noise[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(5): 61-67.
- [22] 叶小敏, 林明森, 梁超, 等. 基于SAR图像雨团足印的海面风向提取方法[J]. *海洋学报*, 2018, 40(4): 41-50.
Ye Xiaomin, Lin Mingsen, Liang Chao, et al. Sea surface wind directions retrieval method based on footprints of rain cells on SAR im-

- ages[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(4): 41–50.
- [23] Zheng Quanan, Clemente-Colón Pablo, Yan Xiaohai, et al. Satellite synthetic aperture radar detection of Delaware Bay plumes: Jet-like feature analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(3): 325–347.
- [24] Zheng Quanan, Lin Hui, Meng Junmin, et al. Sub-mesoscale ocean vortex trains in the Luzon Strait[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(C4): 977–990.
- [25] Contreras R F, Plant W J. Surface effect of rain on microwave backscatter from the ocean: Measurements and modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(C8): 275–303.
- [26] Xu Feng, Li Xiaofeng, Wang Peng, et al. A backscattering model of rainfall over Rough Sea surface for synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2015, 53(6): 3042–3054.
- [27] Zhang Guosheng, Li Xiaofeng, Perrie W, et al. Rain effects on the hurricane observations over the ocean by C-band synthetic aperture radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(1): 14–26.
- [28] Meissner T, Wentz F J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(9): 1836–1849.
- [29] Cox C S, Munk W H. Statistics of the sea surface derived from sun glitter[J]. *Journal of Maritime Research*, 1954, 13: 198–227.
- [30] Thomas B R, Kent E C, Swail V R. Methods to homogenize wind speeds from ships and buoys[J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(7): 979–995.
- [31] Elfouhaily T M, Chapron B, Katsaros K, et al. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C7): 15781–15794.
- [32] Stofflen A, Anderson D. Scatterometer data interpretation: Measurement space and validation of the transfer function CMOD4[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(6): 5767–5780.
- [33] Stoffelen A, Verspeek J A, Vogelzang J, et al. The CMOD7 geophysical model function for ASCAT and ERS wind retrievals[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2017, 10(5): 2123–2134.
- [34] Thompson D R, Elfouhaily T M, Chapron B. Polarization ratio for microwave backscattering from the ocean surface at low to moderate incidence angles[C]// *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings*, 1998. IEEE International, 1998: 1671–1673.
- [35] 赵中阔, 刘春霞. 华南近海两浮标点的波浪特征分析[J]. *广东气象*, 2013, 35(6): 17–22.
Zhao Zhongkuo, Liu Chunxia. Wave characteristics of two buoy points in South China offshore[J]. *Guangdong Meteorology*, 2013, 35(6): 17–22.
- [36] Morena L C, James K V, Beck J. An introduction to the RADARSAT-2 mission[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2004, 30(3): 221–234.
- [37] Jiang Xingwei, Lin Mingsen, Liu Jianqiang, et al. The HY-2 satellite and its preliminary assessment[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2012, 5(3): 266–281.
- [38] 蒋兴伟, 林明森, 宋清涛. 海洋二号卫星主被动微波遥感探测技术研究[J]. *中国工程科学*, 2013, 15(7): 4–11.
Jiang Xingwei, Lin Mingsen, Song Qingtao. Active and passive microwave remote sensing technology of the HY-2A ocean satellite mission[J]. *Engineering Sciences*, 2013, 15(7): 4–11.
- [39] 叶小敏, 林明森, 宋庆君. 基于现场观测数据的卫星雷达高度计海面风速和有效波高真实性检验方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(1): 26–32.
Ye Xiaomin, Lin Mingsen, Song Qingjun. Research on validation methods of satellite radar altimeter retrieved sea surface wind speed and significant wave height using in-situ data[J]. *Remote Sensing Technology and application*, 2014, 29(1): 26–32.
- [40] Luscombe A. RADARSAT-2 product format definition. Richmond[Z]. Canada: MacDonald Dettwiler RN-RP-51-2713, 2008.
- [41] Ye Xiaomin, Lin Mingsen, Xu Ying. Validation of Chinese HY-2 satellite radar altimeter significant wave height[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(5): 60–67.
- [42] Chelton D B, McCabe P J. A review of satellite altimeter measurement of sea surface wind speed: With a proposed new algorithm[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(C3): 4707–4720.
- [43] Witter D L, Chelton D B. A Geosat altimeter wind speed algorithm and a method for altimeter wind speed algorithm development[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(C5): 8853–8860.
- [44] Blanc F, Borra M, Boudou P, et al. AVISO User Handbook—Merged TOPEX/Poseidon Products (GDR-Ms)[Z]. AVI-NT-02-101-CN, Edition 3.0, 1996.
- [45] Picot N, Desai S. AVISO and PODAAC User Handbook—IGDR and GDR Jason-1 Product[Z]. SMM-MU-M5-OP-13184-CN, Edition 4.1, 2008.
- [46] Dumont J P, Rosmorduc V, Carrere L, et al. OSTM/Jason-2 Products Handbook[Z]. SALP-MU-M-OP-15815-CN, Edition 1 rev 9, 2015.
- [47] Young I R. An estimate of the Geosat altimeter wind speed algorithm at high wind speeds[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(C11): 20275–20285.
- [48] 穆博, 林明森, 彭海龙, 等. HY-2卫星微波散射计反演风矢量产品真实性检验方法研究[J]. *中国工程科学*, 2014, 16(6): 39–45.
Mu Bo, Lin Mingsen, Peng Hailong, et al. Validation of wind vectors retrieved by the HY-2 microwave scatterometer using NCEP model data[J]. *Engineering Sciences*, 2014, 16(6): 39–45.

Comparisons of composite radar backscattering model and sea surface radar backscatter from synthetic aperture radar, scatterometer and altimeter

Ye Xiaomin^{1,2}, Lin Mingsen^{1,2,5}, Song Qingtao^{1,2}, Liao Fei³, Liang Chao^{1,2}, Zhou Xuan⁴

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, State Oceanic Administration, Beijing 100081, China; 3. Guangzhou Meteorology Observatory, Guangzhou 511430, China; 4. Mail-box 5111, Beijing 100094, China; 5. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: Comparison with Geophysical Model Function (GMF) developed by methods of empirical statistics, ocean microwave scattering model works well at all microwave frequency. Composite radar backscattering model is comprised of Bragg scattering model and geometrical optics model. We calculated the normalized radar cross sections (NRCSs) from the composite scattering model by using the sea surface wind speeds and directions measured by buoys moored in the northern of South China Sea in the whole year of 2014, and then compared them with SAR on board RADARSAT-2 at C-band, microwave scatterometer on board HY-2A satellite (HSCAT) at Ku-band, respectively. The biases of comparison are (-0.22 ± 1.88) dB (for SAR), (0.33 ± 2.71) dB (for HSCAT in VV polarization) and (-1.35 ± 2.88) dB (for HSCAT in HH polarization), respectively. We also calculated the NRCSs from the model by using the sea surface wind speeds and directions measured by NDBC buoys in the time period from October 1, 2011 to September 30, 2014, and then compared them with radar altimeter on board Jason-2 and HY-2A both at Ku-band with the bias of (1.01 ± 1.15) dB and (1.12 ± 1.29) dB, respectively. Although the biases of NRCSs between space-borne sensors and composite scattering model in medium and normal incidence are different each other, the accuracies of their sea surface wind speed products are the same (i.e. the root mean square errors are all less than 1.71 m/s). The results show that we can simulate the sea surface radar NRCSs of satellite-borne SAR, microwave scatterometer, and altimeter by using the composite radar backscattering model, and the simulations are consistent with that of CMOD5, NSCAT-2 and the GMF of operational wind retrieval for altimeter. It also indicates that the composite radar backscattering model could be used in calibration and validation of microwave sensors and simulation of radar backscatter from sea surface.

Key words: radar backscattering model; synthetic aperture radar; scatterometer; altimeter