

## 海面散射仿真中不同波浪谱和松弛率模型选取的对比研究

王小青 余颖 陈永强 朱敏慧

(中国科学院电子学研究所微波成像国家重点实验室 北京 100190)

**摘要:** 海面微波散射仿真对于实孔径、合成孔径雷达海洋遥感应用研究以及海洋监测雷达系统设计和信号处理都有很重要的意义, 目前的海面散射仿真方法主要是基于复合表面模型来进行的, 这些仿真方法都要用到海浪谱和松弛率模型。由于海浪谱、松弛率尤其是小尺度部分难以精确测量, 不同的实验和拟合方法得到的模型有较大的差别, 从而导致仿真海面散射结果往往相差较大, 常常让人不知如何选取。该文比较了几种典型的海浪谱和松弛率模型的海面散射仿真结果与实测数据的差异, 结果表明 Romeiser 提出的波浪谱在 L-Ku 波段, 2-20 m/s 风速范围内较其他波浪谱更好。而两种主要的松弛率模型的仿真结果差异不大。该结果可作为海面散射仿真中选取波浪谱和松弛率模型的参考。

**关键词:** 海面散射; 波浪谱; 松弛率

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)02-0476-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01819

## The Selection of the Spectrum and Relax Rate Model in the Ocean Backscatter Simulation

Wang Xiao-qing Yu Ying Chen Yong-qiang Zhu Min-hui

(Nat. Key Lab of Microwave Imaging Tech., Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The ocean backscatter simulation is an important work for the ocean radar remote sensing application research and the design of the radar system for the ocean surveillance. Most of the ocean backscatter simulation models are based on the composite surface model, which involves the ocean wave spectrum and relax rate model. The numerous ocean spectrum and relax rate models are quite different from each other due to the different experimental and data fix methods. The different ocean spectrum and relax rate often lead to different ocean backscatter simulation results. In this paper, some typical ocean spectrum and relax rate models are used for the backscatter simulation and the results are compared with the experimental ocean scattering data. The comparison shows that the Romeiser spectrum model is better than other ocean spectrum models under the L-Ku band and 2-20m/s wind velocity, and the simulation results using different relax rate models are almost equivalent.

**Key words:** Ocean backscatter; Wave spectrum; Relax rate

### 1 引言

海面微波散射仿真对于实孔径、合成孔径雷达海洋遥感应用研究以及海洋监测雷达系统设计和信号处理都有很重要的意义。海面微波散射仿真方法的研究经过了 20 多年的发展, 基于复合表面模型的仿真方法基本得到了广泛的认同, 例如 Romeiser<sup>[1,2]</sup>提出的基于二阶调制的微波散射模型, Plant<sup>[3]</sup>提出的随机多尺度散射模型, 余颖等<sup>[4]</sup>提出的散射模型等都是基于复合表面模型基本思想的进一步细化和发展的模型。在这些基于复合表面模型的海面散射方法都要用到海面波浪谱和松弛率模型, 其仿真结果

尤其对小尺度(厘米、分米量级波长)波浪谱和松弛率敏感。

海面的波浪谱和松弛率模型非常复杂, 难以通过理论分析得出精确的模型, 很多参数都依赖试验测量以及对测量结果的统计和数值拟合。不同试验由于试验条件、测量精度、数值拟合方法得出的波浪谱和松弛率模型往往有较大差距, 尤其是小尺度波浪谱部分难以得到精确的测量。即使在相同的海面散射建模的情况下, 采用不同波浪谱和松弛率模型得到的仿真结果往往相差很大。目前有关海面散射仿真的文献中除了仿真方法有一定差异外, 所用到的波浪谱和松弛率模型也往往各不相同, 没有一个公认的选取标准, 目前也没有文献系统地对波浪谱和松弛率模型进行对比分析。

目前国际上波浪谱模型很多, 比较著名的就有十多种, 早期的模型主要针对大尺度波浪谱, 在小

2008-12-29 收到, 2009-10-09 改回

国家自然科学基金(40706063)和微波成像技术国家重点实验室基金(MITL-2008-01)资助课题

通信作者: 王小青 huadaqq@126.com

尺度范围内不太精确,不太适用于海面散射仿真,本文未列入对比的范围。近 10 几年来为了满足海洋微波遥感和海面电磁散射仿真的需要,许多学者发展了新的波浪谱模型,相对于早期的波浪谱模型,这些模型主要在小尺度部分进行了更精确的测量和拟合。本文针对 3 种近年来常用的波浪谱模型进行了对比,包括 Romeiser 在文献[1]中介绍的波浪谱,Plant 在文献[3]中介绍的 D 谱和 Elfouhaily 在文献[5]中提出的统一波谱模型。常用的两种松弛率模型是分别是 Hughes 松弛率和 Plant 松弛率模型<sup>[2,3]</sup>。本文采用文献[4]中的海面复合表面散射模型,对这 3 种波浪谱和两种松弛率模型的海面散射仿真结果进行了对比,并与文献[1-3,6]中报导的海面散射实测数据进行对比,对比参数包括波段(1.2 G-14 GHz),入射角(30°-60°),风速(2 m/s-20 m/s),风向。对比结果表明 Romeiser 谱比其他波浪谱模型更接近实测数据,而两种松弛率模型仿真结果非常接近。本文的研究结果可以作为海面散射仿真中选取波浪谱和松弛率模型的参考。

## 2 海面散射仿真模型

本文的散射建模方法采用文献[4]的模型,该模型借鉴了文献[1,2]和文献[3]模型的优点,其结果更接近实测数据<sup>[4]</sup>。

对于高斯粗糙面来说,IEM 模型<sup>[7,8]</sup>和小坡度模型<sup>[9]</sup>的单次散射都可以表示成如下的形式

$$\sigma_{qp} = k^2/4\pi \exp[-4\varphi(0)k_z^2] |\Gamma_{qp}|^2 \cdot \int \exp[-2jk_H \cdot \mathbf{x}] \{ \exp[4k_z^2 \varphi(\mathbf{x})] - 1 \} d\mathbf{x} \quad (1)$$

其中  $q$ 、 $p$  分别为接收和发射的极化方向,  $k$  为电磁波波数,  $k_z$ 、 $k_H$  分别为  $k$  在垂直方向和水平面内的分量,  $|\Gamma_{qp}|^2$  为极化因子<sup>[7,8]</sup>,  $k_x$ 、 $k_y$  分别为电磁波波数在水平面内  $x$ 、 $y$  方向的分量。 $\varphi(\mathbf{x})$  为海面波高的自相关函数,与波浪谱  $W(k)$  的关系为  $\varphi(\mathbf{x}) = \iint W(k) \exp(jk \cdot \mathbf{x}) dk$ 。

直接计算式(1)积分计算量太大,因此需要将波浪谱分为大、中、小 3 种尺度,利用基尔霍夫大尺度散射和 Bragg 小尺度散射近似进行简化计算。

$$\begin{aligned} \varphi(\mathbf{x}) &= \int_{|k| \leq k_l} W(k) \exp(ik \cdot \mathbf{x}) dk \\ &+ \int_{k_s > |k| > k_l} W(k) \exp(ik \cdot \mathbf{x}) dk \\ &+ \int_{|k| \geq k_s} W(k) \exp(ik \cdot \mathbf{x}) dk \\ &= \varphi_l(\mathbf{x}) + \varphi_i(\mathbf{x}) + \varphi_s(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (2)$$

其波数划分尺度  $k_l$ 、 $k_s$  满足  $4k_z^2 \varphi_l(0) = 10$ ,  $4k_z^2 \varphi_s(0)$

$= 0.1$ 。

将式(1)的积分范围为 3 部分:  $|\mathbf{x}| \leq 2\pi/k_s$ ,  $2\pi/k_s < |\mathbf{x}| < 2\pi/k_l$ ,  $|\mathbf{x}| \geq 2\pi/k_l$ , 在  $|\mathbf{x}| \leq 2\pi/k_s$  积分限内,  $\varphi_i(\mathbf{x}) \approx \varphi_i(0)$ ,  $\varphi_l(\mathbf{x}) \approx \varphi_l(0)$ , 此时可以利用 Bragg 近似,这也称为小尺度散射;在  $|\mathbf{x}| \geq 2\pi/k_l$  的积分限内  $\varphi_s(\mathbf{x}) \approx 0$ ,  $\varphi_i(\mathbf{x}) \approx 0$ , 此时可以利用基尔霍夫近似,这也称为大尺度散射。因此散射值可以表示为大、中、小尺度散射之和的形式<sup>[4]</sup>

$$\sigma_{qp} = \sigma_{qp}^l + \sigma_{qp}^i + \sigma_{qp}^s \quad (3)$$

但是海面并不符合高斯随机分布,一个证据就是海面在顺风和逆风入射状态下散射强度不等。一个解决方法是在散射模型中考虑海面的高阶谱的影响<sup>[8,10]</sup>,这虽然在数学上比较严密,但目前对海面高阶谱的测量还没有公认的结果,而且这种方法得到的是大范围海面的平均散射,不能仿真海面散射的纹理信息。另一个方法是采用复合表面模型,将海面进行尺度分割,每个局部仍然视为高斯随机表面,只是各个局部的波浪谱被大、中尺度波的倾斜和流体动力调制效应改变,因此各局部的散射不同,这虽然数学上不太严密,但因为倾斜和流体动力调制模型较为成熟,且这种方法可以仿真出海面的纹理,因此在海面散射仿真中应用很广。

当分辨单元不是太大的情况下(例如 SAR 的分辨率一般在数米到数十米之内),一个分辨单元内  $\sigma_{qp}^l$ 、 $\sigma_{qp}^i$  可以认为是基本不变的。因此一个分辨单元内的平均 NRCS 为

$$\langle \sigma_{qp} \rangle \approx \sigma_{qp}^l + \sigma_{qp}^i + \langle \sigma_{qp}^s \rangle \quad (4)$$

式中  $\langle \cdot \rangle$  表示在一个分辨单元范围内平均。本地倾角和流体动力调制会改变  $\sigma_{qp}^s$ , 按海面坡度泰勒展开,其中奇次阶项平均后为 0,偶次阶会保留下来,如果忽略 4 阶以上的项则

$$\langle \sigma_{qp} \rangle \approx \sigma_{qp}^l + \sigma_{qp}^i + \sigma_{qp0}^s + \sigma_{qp2}^s \quad (5)$$

其中  $\sigma_{qp0}^s$  为倾角和流体动力调制为 0 时平均小尺度散射。 $\sigma_{qp2}^s$  为二阶散射项,  $\sigma_{qp2}^s$  可以表示为  $\sigma_{qp2}^s = \int_{|k| < k_b} \chi W(k) dk$  的形式。其中  $k_r$  为分辨单元尺度所对应的波数,  $k_b$  为 Bragg 波波数,  $\chi$  为一个与中尺度波浪谱、松弛率有关的复杂表达式,具体可以参考文献[4]。

## 3 波浪谱和松弛率

由于不同研究者的实验方法、数值拟合方法不同,所得出的波浪谱模型都有一定的差异。本文主要针对 3 种近年来常用于海面散射仿真计算的波浪谱模型进行了对比,包括 Romeiser 在文献[1]中介绍

的波浪谱(以下简称 R 谱), Plant 在文献[3]中介绍的 D 谱(以下简称 D 谱)和 Elfouhaily 在文献[5]中提出的统一波谱模型(以下简称 E 谱)。这 3 种谱的输入参数一致, 都是离海面 10 m 处的风速。

R 谱是 Romeiser 借鉴 Apel 波浪谱的拟合方法<sup>[1]</sup>, 通过对一系列海面散射实验结果反推拟合出的波浪谱模型, 其表达式为  $W(k, \theta, u) = P_L(k, u) \cdot W_H(k)(u)^{\beta(k)} k^{-4} S(k, \theta, u)$ , 其中  $P_L(k, u)$ ,  $\beta(k)$ ,  $W_H(k)$ ,  $S$  请参考文献[1]。

D 谱是对 DHH, Banner, Plant 3 种谱的一个修正和结合, 其表达式为

$$W(k, \theta) = F(k)D(k, \theta), \quad D(k, \theta) = \text{sech}^2(B\theta),$$

$$F(k) = F_g(k)(1-a) + F_c(k)a \quad (6)$$

其中  $B$ ,  $F_g(k)$ ,  $F_c(k)$ ,  $a$  的表达式较为复杂, 具体参考文献[3]。

E 谱是 Elfouhaily 对 JONSWAP、Phillips、Kitaigorodskii 等波浪谱的一个修正和结合, Elfouhaily 将其仿真结果与海面和水槽水动力实验结果进行了一些对比, 但并没有与散射结果进行对比。其表达式为

$$W(k, \theta) = F(k)D(k, \theta), \quad F(k) = k^{-4} [F_l(k) + F_h(k)],$$

$$D(k, \theta) = G(s) \cos(\theta/2)^s \quad (7)$$

其中  $F_l(k)$ 、 $F_h(k)$  分别为低频、高频成分,  $s$  为角

扩展参数, 具体表达式参考文献[3,5]。

图 1 是 3 种波浪谱在风向方向( $\theta = 0$ )的对比图。图中横坐标为波数  $k$ , 纵轴为  $k^4$  归一化后的波浪谱  $W(k)k^4$ , 3 种波浪谱主要差别主要体现在中高波数区, 低风速时差别更明显, 而散射正是对这个谱段最为敏感。

松弛率是描述流体动力调制中波浪谱偏离稳态值时的“恢复力”系数, 常用的两种松弛率模型分别是 Hughes 模型(以下简称 H 松弛率)和 Plant 模型(以下简称 P 松弛率)<sup>[2,7]</sup>。

H 松弛率模型为

$$\mu(\mathbf{u}_*, \mathbf{k}) = \begin{cases} \mathbf{u}_* \cdot \mathbf{k} (0.01 + (0.016 \mathbf{u}_* \cdot \mathbf{k}) / \omega_0) [1 \\ - \exp(-8.9 \sqrt{(\mathbf{u}_* \cdot \mathbf{k}) / \omega_0 - 0.03})], & (|\mathbf{u}_* \cdot \mathbf{k}|) / \omega_0 > 0.03 \\ 0, & (|\mathbf{u}_* \cdot \mathbf{k}|) / \omega_0 \leq 0.03 \end{cases} \quad (8)$$

其中  $\mathbf{u}_*$  为摩擦风速矢量, 它与海面上 10 m 处的风速有一些半经验的转换关系模型<sup>[3]</sup>,  $\omega_0$  是波数为  $k$  的波浪振动频率。

P 松弛率模型为  $\mu(\mathbf{u}_*, \mathbf{k}) = 0.043 |\mathbf{u}_* \cdot \mathbf{k}| |\mathbf{u}_*| |\mathbf{k}| / \omega_0$ 。图 2 是两种松弛率在风向方向的对比。

从图 2 中可以看出 P 松弛率在低频波区域小于 H 松弛率, 而在高频波区域大于 H 松弛率, 但二者

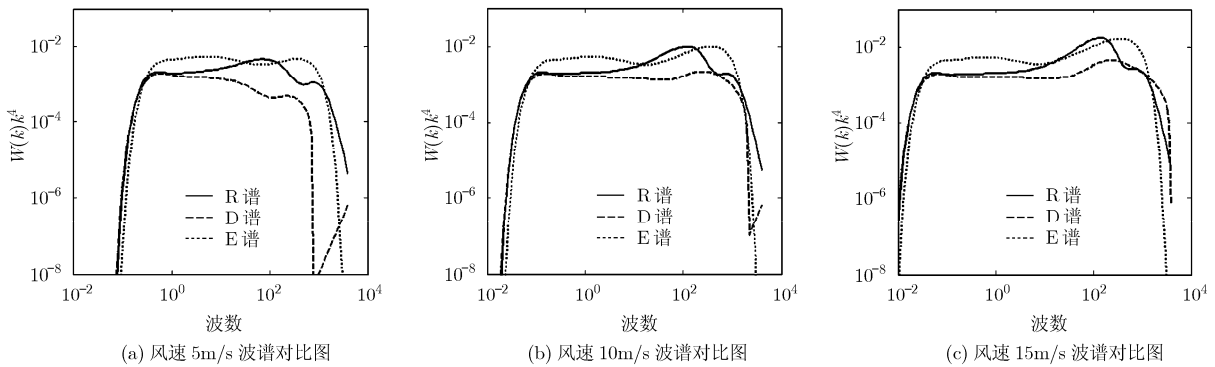


图 1

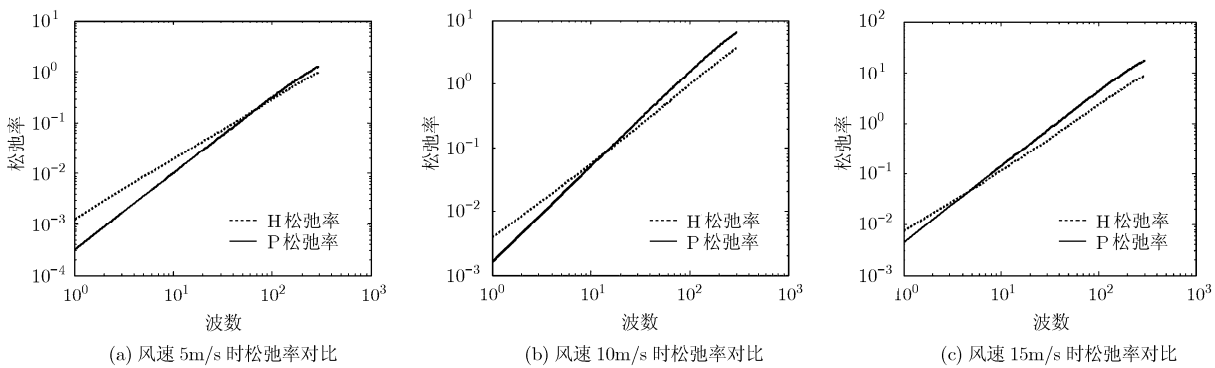


图 2

差别不是太大。

### 4 散射仿真结果对比

本文将 3 种波浪谱、两种松弛率模型代入第 2 节介绍的散射模型中进行对比, 并与文献[1-3,6]中的海面散射实测数据进行对比。

图 3 是 5.3 GHz(C 波段)、VV 极化、45° 入射角度, 3 种不同视向情况下, 3 种波浪谱仿真 NRCS 随风速变化与实测数据对比(松弛率模型选用 P 松弛率)。

从上面的对比可以看出 R 谱在 C 波段与实测数据吻合很好, 这主要是因为 R 谱主要是根据 C 波段实测数据反推拟合而成。

图 4 是 13.9 GHz(Ku 波段)、30° 入射角度, 两种极化状态下, 3 种波浪谱仿真 NRCS(各视向的平

均 NRCS)随风速变化与实测数据对比(松弛率模型选用 P 松弛率)。

从图 4 可以看出, 在 Ku 波段 R 谱随不同风速变化的仿真 NRCS 与实测数据相比也比其他两种谱更好, 且值得一提的是这里用到的 Ku 波段实测数据是 Plant 在 1998 年公开的<sup>[6]</sup>, Romeiser 拟合 R 谱时并没有用到这些数据。

图 5 是 30° 入射角, 风速 10 m/s, 两种极化状态下, 3 种波浪谱仿真 NRCS(各视向的平均 NRCS)随入射波波段变化与实测数据对比(松弛率模型选用 P 松弛率)。

从图 5 可以看出, 从 L 到 Ku 波段, R 谱的适用性要明显强于 D 谱和 E 谱, 而且这里用到的实测

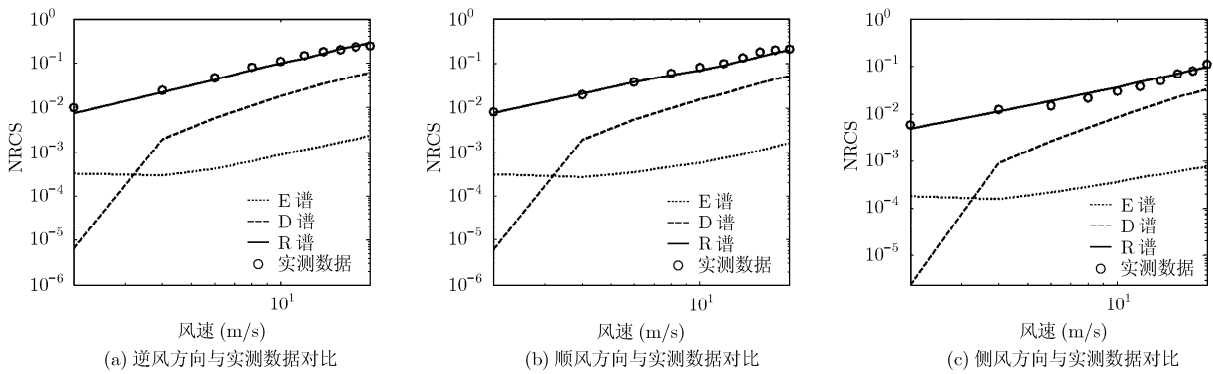


图 3

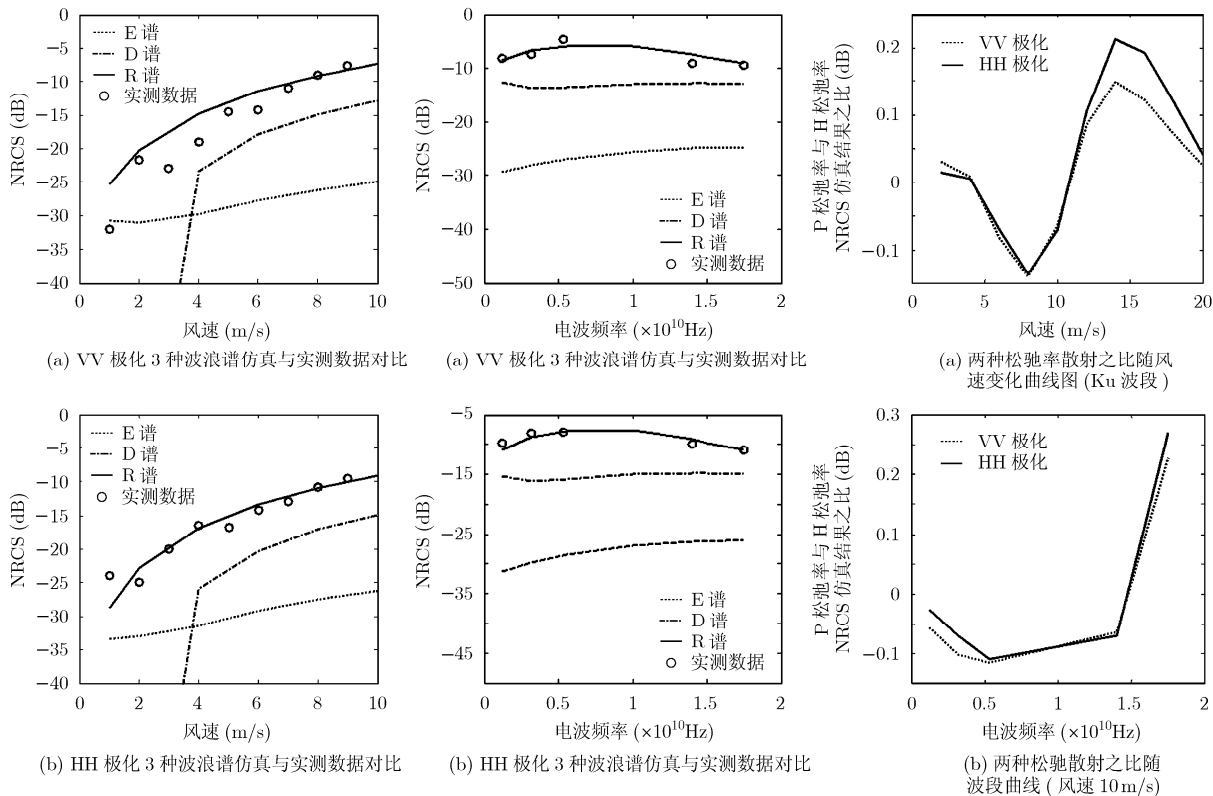


图 4

图 5

图 6

数据来自文献[3], 也不是 Romeiser 拟合 R 谱时所用到的数据。

从上面的一系列对比可以看出 R 谱仿真的 NRCS 随风速(2-20m/s)、波段(L-Ku)、极化(HH、VV)等参数变化与实测数据都有较好的适用性。

图 6 是 60° 入射角情况下, 采用 P 松弛率和 H 松弛率的 NRCS 仿真结果之比(各视向平均)随风速和频率的变化(波浪谱模型采用 R 波浪谱)。

从图 6 可以看出采用两种松弛率模型仿真结果差距很小, 在 1 dB 量级以下。这主要是因为松弛率只与式(8)中的二阶散射项有关, 而且只影响二阶项中与流体动力调制有关的项。

## 5 结论

通过本文的比较可以看出, R 谱在 2-20m/s 风速范围, L-Ku 波段, 中等入射角, HH, VV 极化下适用性好于 D 谱和 E 谱; 采用 H 松弛率和 P 松弛率模型的散射仿真结果非常接近, 对仿真结果影响不大。

## 参考文献

- [1] Romeiser R, Alpers W, and Wismann V. An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface, 1. Theory of the model and optimization / validation by scatterometer data. *Journal of Geophysic Research*, 1997, 102(11): 25237-25250.
- [2] Romeiser R and Alpers W. An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface, 2. Model response to surface roughness variations and the radar imaging of underwater bottom topography. *Journal of Geophysic Research C*, 1997, 102(11): 25251-25267.
- [3] Plant W J. A stochastic, multiscale model of microwave backscatter. *Journal of Geophysic Research C*, 2002, 107(9): 3120.
- [4] 余颖, 王小青, 朱敏慧, 基于二阶散射的海面雷达后向散射模型. *电子学报*, 2008, 36(9): 1771-1775.  
Yu Ying and Wang Xiao-qing, et al. Three scale radar backscattering model of the ocean surface based on second order scattering. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(9): 1771-1775.
- [5] Elfouhaily T, Chapron B, and Katsaros K, A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves. *Journal of Geophysic Research*, 1997, 102(C7): 15781-15796.
- [6] Plant W J, Keller W C, Hesany V, and Hayes K. Measurements of the marine boundary layer from an airship. *Journal of Atmosphere and Oceanic Technology*, 1998, 15(12): 1433-1458.
- [7] Fung A K, Li Z, and Chen K S. Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(3): 356-369.
- [8] Fung A K. *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*, Artech House, 1994, Chapter 5.
- [9] Voronovich A G. Small-slope approximate for electromagnetic wave scattering at the rough interface of two dielectric half-space. *Waves Random Meida*, 1994, 4(2): 337-367.
- [10] Chen K S and Feng A K. A backscattering model for sea surface. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 811-817.
- [11] Apel J R. An improved model of the ocean surface wave vector spectrum and its effects on radar backscatter. *Journal of Geophysic Research*, 1994, 99(10): 16269-16291.

王小青: 男, 1978 年生, 博士, 副研究员, 研究方向为雷达信号与信息处理、海洋微波成像。

余颖: 女, 1981 年生, 博士生, 研究方向为信号与信息处理。