

文章编号: 1007-4619(2007)04-0446-06

合成孔径高度计的海面回波仿真

杨双宝^{1,2}, 刘和光¹, 许 可¹, 王志森¹

(1. 中国科学院 空间科学与应用研究中心, 北京 100080; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 本文首先采用经验海浪谱仿真了三维海面, 进而在此基础上根据镜面反射理论计算了海面小面元散射系数。然后根据雷达方程和合成孔径高度计的合成孔径处理计算了海面回波信号的矩阵, 以便给出最终的功率回波。在目前国内外缺少相应试验数据的条件下, 验证了合成孔径高度计工作方式的有效性, 经验证其回波模型基本正确。同时, 为了与传统高度计比较, 给出了传统高度计在相同参数下的回波仿真结果。文章还通过展示合成孔径高度计在同种波高、不同涌浪和风浪方向情况下的回波, 说明波浪方向也会影响合成孔径高度计回波。

关键词: 合成孔径; 高度计; 海面回波; 仿真

中图分类号: TP732.1 **文献标识码:** A

The Simulation of Sea Surface Echo of Synthetic Aperture Radar Altimeter

YANG Shuang-bao², LU He-guang, XU Ke, WANG Zhi-sen

(1. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The 3-dimension sea surface is simulated by using empirical sea wave spectrum, and then the radar cross section is computed with the use of specular reflection theory. The signal returned from sea surface is then computed by employing radar equation and synthetic processing to simulate sea surface echo wave. Although there is no synthetic aperture radar altimeter data at present, the simulation result shows that synthetic aperture radar altimeter is efficient and the echo wave model could be used to describe its return wave. The conventional return wave simulation is also presented simultaneously to compare with echo wave of synthetic aperture radar altimeter. Another conclusion is that synthetic aperture radar altimeter may reveal wave direction from simulation result of some sea status.

Key words: radar altimeter; synthetic aperture; echo wave; simulation

1 引 言

传统海洋卫星高度计在卫星平台飞行过程中, 朝海面发射电磁波脉冲并接收回波, 然后对回波进行处理, 从而测定海平面高度、风速和浪高。合成孔径高度计继承了传统高度计底视测量和脉冲有限的工作方式, 但是在卫星平台飞行过程中, 发射并接收

一系列回波, 并对这些回波进行孔径合成处理, 从而提高了方位分辨率, 而且充分利用了方位向波束内的能量, 提高了信噪比^[1,2]。

早在 20 世纪 80 年代就有关于合成孔径技术在高度计中的应用报道^[3], 但是由于在孔径合成过程中, 目标对于雷达的位置不断变化, 从而导致最终的测高效果并不理想^[3]。也有作者研究了 DBS 技术在高度计中的使用^[4], 但是效果也不如意^[1]。直到

收稿日期: 2006-05-12 修订日期: 2006-10-22

基金项目: 中国科学院空间中心创新基金(编号: 2517A1 S)

作者简介: 杨双宝(1975—), 男, 博士生, 微波遥感专业, 已发表论文 4 篇, 专利 1 项。E-mail: ysl@rmis.ac.cn

90年代中后期, Ranney^[1]提出了延迟补偿的思想,才找到了合成孔径技术在高度计应用中的理想方式。从 20 世纪末到本世纪初,已经有基于合成孔径高度计思想的新体制高度计问世^[5-9],同时也有相关项目正在制定和进行中^[7]。欧空局本来计划使用 CRYOSA 就该体制高度计做飞行试验,但是不幸在 2005 年 10 月份发射失败,所以到目前为止,并没有实际观测的数据可以应用。关于合成孔径高度计仿真, Yiping Sun 曾经仿真过用其成像结果测量海浪谱^[8],指出其成像结果可以给出海浪谱,但是存在 45° 模糊。据笔者所知,目前尚没有关于回波是否可以直接揭示海浪方向信息的报道,也没有关于其回波的仿真研究的文献报道。而关于传统高度计的回波仿真及其应用,则有很多报道^[9-11]。

为了研究合成孔径高度计在海洋观测中的回波特点,本文首先使用经验海洋波谱仿真了一个接近真实的三维海面,进而仿真合成孔径高度计的海面回波。仿真的具体步骤为:

- (1) 使用二维海洋波谱仿真三维海面,并根据海面镜面散射模型计算散射系数;
- (2) 根据仿真的三维海面高度分布及其散射系数,计算雷达接收到的原始回波数据;
- (3) 对接收到的回波进行孔径合成处理以得到合成孔径高度计的回波;
- (4) 对接收到的回波进行抽选并做传统处理以得到传统高度计的回波。

鉴于在高度计应用合成孔径方法时,聚焦方式和非聚焦方式的主要思想大体相同,因此,虽然本文数据图文结果都是非聚焦合成孔径处理的结果,但是本文没有明确强调这一点。方便起见,下文简称传统实孔径高度计为传统高度计。

2 三维海面及其散射系数仿真

海浪的成分主要可以分为涌浪和风生波浪。涌浪的波谱很窄,但是能量很大,而风浪的波谱相对比较宽,但是能量相对来说比较小。根据双尺度模型,涌浪对于波浪高度和海平面高度影响很大;风浪影响相对较小。但是风浪对于海面散射单元散射截面影响很大,对于天底入射的高度计而言,涌浪对于散射截面也有影响^[12]。因此,本文在仿真真实海面时,使用涌浪谱和风浪谱共同构成的海浪谱。同时,在合成孔径高度计工作方式下,对海面做冻凝假设^[13]而只仿真静态海面。

海洋学家提出了很多波谱模型用来描述海面风浪^[14]。为了适应高度计仿真需要,本文使用 Donejan 和 Piesoh^[15]提出的风浪波谱模型。该模型使用相对于风向的波数和波向作为参数,给出了海洋表面高度的二维功率谱密度函数。该模型描述如下:

$$\Psi_{wind}(k, \chi) = 1.62 \times 10^{-3} W \exp(-k/k_0) \cdot 1.7^{F(W/k_0)} \cdot \eta(k/k_0) \sec^2[\eta(k/k_0)(\chi - \chi_0)] \quad (1)$$

式中,

$$F(W/k_0) = \exp\{-1.22[(k/k_0)^{0.5} - 1]^2\}$$

$$k_0 = g/(1.2W)^2$$

$$\eta(k/k_0) = \begin{cases} 1.24 & 0 < k/k_0 < 0.3 \\ 2.61(k/k_0)^{0.65} & 0.31 < k/k_0 < 0.9 \\ 2.28(k/k_0)^{-0.65} & 0.9 < k/k_0 \end{cases}$$

式中, k 和 χ 表示极坐标下的波数和极角, W 表示海面上 10 m 高处风速, χ_0 表示风向相对于雷达航向的夹角, g 表示本地重力加速度。

根据合成孔径雷达对海洋的观测结果,经验性的涌浪谱表达为高斯形式^[12]:

$$\Psi_{swell}(k_x, k_y) = \langle \hat{h} \rangle / 2\pi \sigma_{k_x} \sigma_{k_y} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{k_x - k_{xm}}{\sigma_{k_x}} \right)^2 + \left(\frac{k_y - k_{ym}}{\sigma_{k_y}} \right)^2 \right] \right\} \quad (2)$$

式中, k_x 和 k_y 分别表示 x 方向和 y 方向的波数, k_{xm} 和 k_{ym} 分别表示波谱峰值对应的波数, σ_{k_x} 和 σ_{k_y} 分别表示 x 方向和 y 方向的波谱宽度, $\langle \hat{h} \rangle$ 表示涌浪波高。

在考虑到海面随机现象的同时,总的海洋波谱可以描述为:

$$S(k_x, k_y) = 2\pi \sqrt{2N_x N_y} \Psi(k_x, k_y) / \Delta_x \Delta_y \cdot \eta(k_x, k_y) \exp[\phi(k_x, k_y)] \quad (3)$$

式中, Δ_x 和 Δ_y 分别为 x 方向和 y 方向的面元尺寸, N_x 和 N_y 分别为 x 方向和 y 方向的面元数目, $\eta(k_x, k_y)$ 符合均方值为 1 的瑞利分布, $\phi(k_x, k_y)$ 在 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布。波谱函数为:

$$\Psi(k_x, k_y) = \Psi_{swell}(k_x, k_y) + \Psi_{wind}(k_x, k_y)$$

海面高度分布 $\eta(x, y)$ 就是 (3) 式傅里叶变换的实部,并用主波高归一化。

根据镜面散射模型,每个面元的散射系数描述为:

$$\sigma^0 = |R(\theta)|^2 \exp(-\tan^2 \theta / \bar{s}) / \bar{s} \quad (4)$$

式中, $R(\theta)$ 为正入射时的菲涅尔反射系数, θ 为本地入射角, \bar{s} 为海面均方根坡度,受风速影响,表达为 $\bar{s} = 3.66 \times 10^{-3} W$ 。对于高度分布为 $\eta(x, y)$ 的海面来说,可以得到

$$\tan^2 \theta = \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2$$

根据傅里叶变换的性质, $f(x, y)$ 对 x 和 y 的偏导数可以分别通过对 k_x 和 k_y 和 k_x 和 k_y 求傅里叶变换得到。

在实际仿真中, 首先确定待观测海域面积, 将待观测海面划分为 $N_x \times N_y$ 个面元。然后根据 (3)式和 (4)式计算整个海面的三维高度分布和散射系数分布。

3 回波信号仿真

与合成孔径成像雷达类似, 合成孔径高度计的回波信号仿真也可以有两种方法。一种是在理想回波上叠加随机噪声信号, 类似于传统高度计的中频信号仿真^[16]。这种仿真方法对于验证合成孔径高度计工作方式的有效性和回波模型的正确性没有太大意义。本文采用另外一种方法, 即首先仿真合成孔径高度计的原始回波数据, 然后再对原始回波数据进行处理^[17], 得到回波信号仿真结果。假设雷达采用高斯天线, 位于 (X_0, y_0) 处的雷达高度计朝海面发射线性调频脉冲信号, 则波束范围内坐标为 (x, y) 的面元在时刻 t 反射到雷达的电磁波信号表达为:

$$S(x, y) = \frac{\lambda^2 \sigma^0}{(4\pi)^3 R^4} G_0 \exp\left[-\frac{2}{\gamma} \sin^2 \alpha\right] e^{j\Phi} \quad (5)$$

式中, λ 为载波波长, 面元到雷达距离 $R = \sqrt{(X-x)^2 + (y-y_0)^2 + h^2}$, G_0 为天线增益, γ 为天线参数, α 为天线对位于面元处且平行于 $x-y$ 平面的入射角, $h' = h - (x, y)$ 。延迟相位

$\Phi = 4\pi k [(X-x)^2 + (y-y_0)^2] / c^2 - 2\pi (kx + cy) [(X-x)^2 + (y-y_0)^2] / h'c$ 式中, k 为调频率, c 为光速。

仿真的具体步骤为:

(1) 确定方位向合成脉冲数目 N 和距离门数目 M ; 确定合成孔径位置阵列, 高度计系统参数, 以及待仿真海域范围和面元大小的划分。

(2) 根据 (5)式计算原始回波矩阵, 并对得到的原始回波先做去斜处理再做方位傅里叶变换。

(3) 根据文献[17]计算延迟补偿矩阵, 并与前面得到的回波矩阵相乘, 完成延迟补偿处理。

(4) 对处理后的回波信号矩阵进行距离向傅里叶变换, 并计算回波功率矩阵。然后将回波功率矩阵沿 X 方向求和, 得到最终的回波功率信号。

对于传统高度计, 由于它采用实孔径方式, 所

以, 只需要从第 (2)步得到的回波矩阵中, 在方位傅里叶变换之前, 在 X 方向上抽取一列作为回波信号, 然后直接计算其回波功率信号, 即可得到传统高度计回波功率信号。

由于上述过程中并没有考虑雷达设备的系统响应函数, 因此得到的海面回波, 实际上是平坦海面冲激响应 $P_{ES}(y)$ 和海面波高概率密度函数 $q(y)$ 的卷积^[17], 即

$$R(y) = P_{ES}(y) * q(y) \quad (6)$$

在文献[2]中, 合成孔径高度计的回波模型是基于雷达在海面上的等效条带足迹的基础上建立的。对于这种方式建立的回波模型, 根据前面的仿真步骤得到的回波和 (6)式的理想结果是否一致, 就可以判断 (6)式表达的回波模型是否正确。如果考虑雷达系统响应函数的作用, 则应该在前面的仿真步骤中将得到的回波和雷达系统响应函数卷积的结果和 (6)式与雷达系统函数卷积的结果相比较, 就可以确定回波模型是否正确。但是这对于验证回波模型的正确性并不是必要的, 因此在仿真步骤中和 (6)式中同时省略了雷达系统响应函数。

4 仿真参数及结果

仿真中所用到的主要系统参数见表 1 海面仿真主要参数见表 2。本文仿真海域为矩形, 面元划分也是矩形。风向角与涌浪方向角分别指风向和涌浪传播方向与雷达航迹向的夹角。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters used in simulation

天线 /m	1.3	雷达高度 /m	8×10^6
波长 /m	2.2	速度 /(m/s)	7.5×10^3
带宽 /MHz	320	误指向角	0°
调频率 /(Hz/s)	-5.5×10^{12}	孔径长 /m	70
脉宽 / μ s	57.8	方位采样数	64
PRF/Hz	13847	距离门数	256

表 2 海面参数

Table 2 Parameters in sea surface simulation

海面长 /km	16	涌浪波长 /m	300
海面宽 /km	16	涌浪方向 /($^\circ$)	90
面元长 /m	10	波高 /m	4
面元宽 /m	10	涌浪谱宽 / σ_{kx}	0.0025
风速 /(m/s)	12	涌浪谱宽 / σ_{ky}	0.0025
风向角 /($^\circ$)	90		

图 1 是按照表 2 中的参数仿真的海面, 看起来明显的波浪纹理是涌浪形成的, 而其中较细的波浪纹理则由风浪形成。如表中参数所示, 这里假设风向与涌浪传播方向一致, 并且和雷达飞行方向垂直。当然, 在仿真中, 可以任意设定风向角和涌浪方向角。

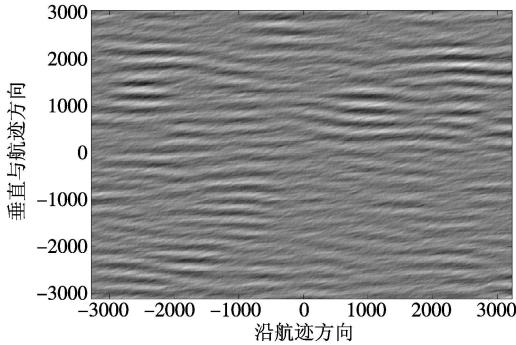


图 1 仿真的海面

Fig 1 Sea surface height distribution

图 2 给出了按照表 1 和表 2 中的参数经过仿真得到的各个多普勒频带对应的海面回波。其形状与文献 [17] 给出的图 9 有相似之处。不同的是文献 [17] 中的图 9 只是平坦海面各个多普勒频带的冲激响应, 而图 2 则包含了根据表 2 参数仿真的海面波高概率密度信息。

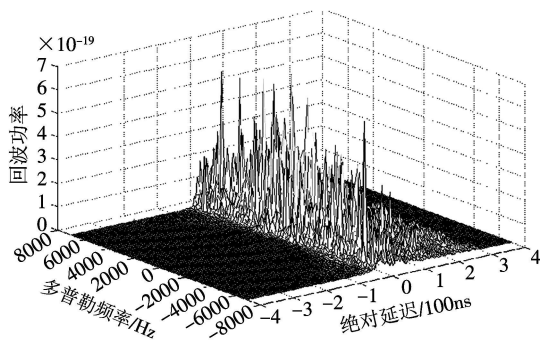


图 2 仿真的海面回波

Fig 2 Simulation echo wave of sea surface

图 3 给出了合成孔径高度计和传统高度计的理想回波与仿真回波。其中幅值较大的实线是合成孔径高度计的理想回波, 幅值较大的虚线是合成孔径高度计的仿真回波; 幅值较小的点线是传统高度计的理想回波, 幅值较小的点划线是传统高度计的仿真回波。由于在求理想回波时设定散射系数为 1, 而求仿真回波中则由仿真海面计算仿真系数, 所以对于合成孔径高度计和传统高度计, 它们各自理想回波幅值和仿真回波幅值都不同。为了便于显

示, 这里把合成孔径高度计和传统高度计的理想回波用一个值 (即它们的最大值) 归一化, 而把合成孔径高度计和传统高度计的仿真回波用另外的值 (即它们的最大值) 归一化, 然后把它们显示出来。同时, 为了显示方便, 在时间延迟轴上, 对 4 条回波曲线做了同样的平移。仿真回波和理想回波使用的参数由表 1 和表 2 给出。合成孔径高度计的理想平坦海面冲激响应回波取自文献 [2], 并按照 (6) 式给出实际海面的理想回波; 传统高度计的理想平坦海面冲激响应回波取自文献 [18], 并按照 (6) 式给出实际海面的理想回波。

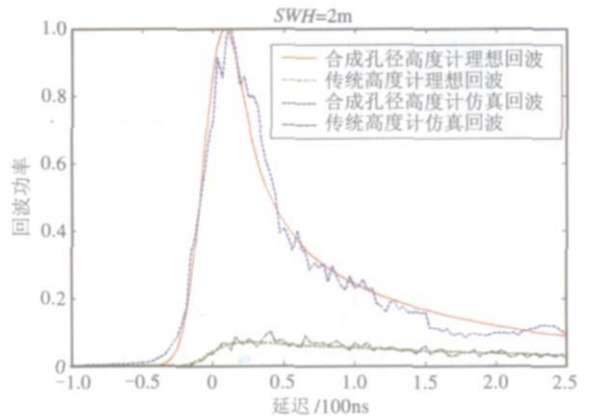


图 3 理想回波与仿真回波

Fig 3 Return wave and echo wave simulation

从图 3 中可以看出, 在 2m 波高情况下, 合成孔径高度计回波功率比传统高度计回波高约 10 倍 (10 dB)。对于合成孔径高度计回波, 理想回波和仿真回波基本一致, 但是理想回波的上升沿的前半部分比仿真的海面回波略有延迟 (大约 3 ns), 这说明理想回波模型基本上是正确的, 但是需要进一步修正。

使用图 3 数据进行的计算结果表明, 在相同的观测时间内, 合成孔径高度计的仿真回波曲线, 比传统高度计的仿真回波的相对均方差更小, 说明合成孔径高度计的回波更稳定, 更平滑。因此可以预测, 为得到稳定有效的观测结果, 合成孔径高度计比传统高度计需要的观测时间短, 分辨率更高, 因此, 在跟踪捕获上反应更灵敏, 有可能完成近海和小范围水域如内陆湖沼的观测。

为了探讨涌浪方向和风浪方向对合成孔径高度计回波的影响, 图 4 给出了合成孔径高度计在不同涌浪方向和风浪方向情况下的海面回波仿真。同时, 图 5 给出了相应情况下传统高度计的海面回波

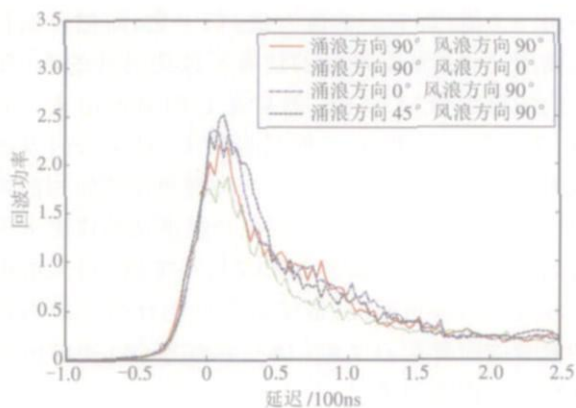


图 4 合成孔径高度计在不同涌浪方向和风向下回波
Fig.4 Echo wave of synthetic aperture radar altimeter under different swell and wind direction

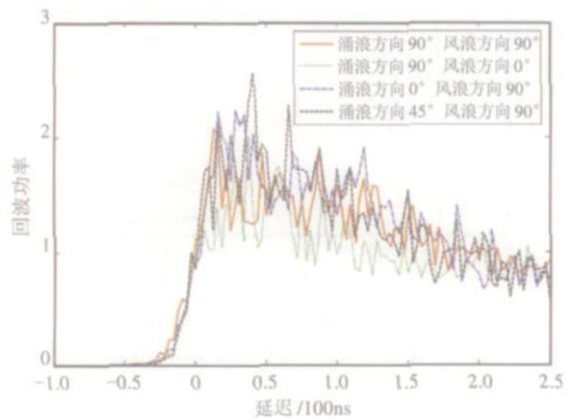


图 5 传统高度计在不同涌浪方向和风向下回波
Fig.5 Echo wave of conventional radar altimeter under different swell and wind direction

仿真。仿真所用的海况参数除涌浪方向和风向在图中各自标示出以外,其他参数如表 2 所示。从图 4 可以看出,涌浪和风向对合成孔径高度计海面回波的前沿影响比较小,这有可能为在不同波浪方向下有稳定的表现提供帮助。而对后沿的影响要比对前沿的影响大,从而使后沿可能揭示涌浪和风向信息。

从图 4 和图 5 的对比可以看出,合成孔径高度计回波和传统高度计回波都是后沿受涌浪方向和风向影响较大,且合成孔径高度计回波后沿受影响比传统高度计明显。同时,合成孔径高度计回波的峰值位置也会受到波向影响。

为了检验误指向角对合成孔径高度计回波的影响,图 6 给出了不同误指向角条件下的仿真结果。结果表明,和传统高度计不同,误指向角对回波波形

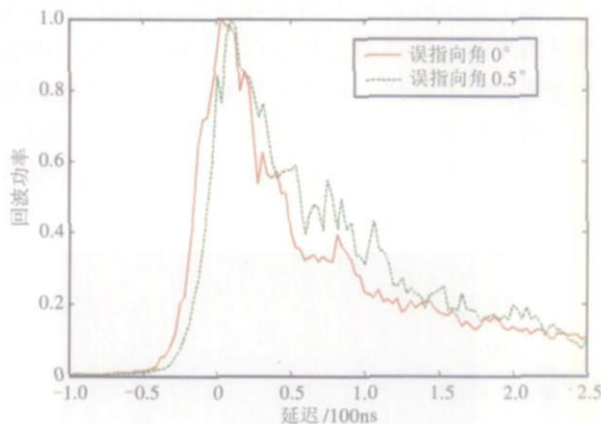


图 6 合成孔径高度计回波随误指向角变化很小
Fig.6 Off-nadir angle has little effect on synthetic aperture radar altimeter echo wave form

的影响很小。

为了便于用仿真回波验证回波模型,同时用仿真回波检验回波模型预言的合成孔径高度计的一些特性,图 2—图 6 采用了多视处理。

5 结 论

(1) 文献 [2] 给出的回波公式基本上正确地描述了合成孔径高度计的海面回波,但是可能在近似计算上需要修正。同时,应该进一步探求整个海面回波的完整简单的解析表达式,以便能够以更小的计算量快速地跟踪估计回波参数。

(2) 合成孔径高度计除了比传统高度计具有高信噪比,对波高更敏感,对误指向角的容忍程度更好等优点之外,还具有可以在短时间内得到稳定平滑回波的优势。

(3) 涌浪的方向和风向对于合成孔径高度计的回波波形有影响,且后沿比较明显。这显示合成孔径高度计的回波中包含涌浪方向和风向信息。

参 考 文 献 (References)

- [1] R Keith Raney. The Delay/Doppler Radar Altimeter [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1578—1588
- [2] Yang S B, Liu H G, Xu K, et al. A Radar Altimeter Concept [A]. Remote Sensing of the Environment 15th National Symposium on Remote Sensing of China, Proceedings of SPE Vol. 6200, 2006
- [3] Griffiths H D, Pursey V ed B. Radar Altimeter with Synthetic Aperture Processing [A]. Conference Proceedings European

- Microwave Conference [C]. 1989, **9**: 281—286
- [4] Picardi Giovanni, Seu Roberto, Sorge Stefano. Extensive Non-coherent Averaging in Doppler Beam Shaped Space-borne Radar Altimeters [A]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [C]. 1998, **5**: 2643—2645.
- [5] R Keith Raney, Walter H F Smith, David T Sandwell, Abyss-Lite. A High-Resolution Gravimetric and Bathymetric Mission [A]. A Collection of Technical Papers. AIAA Space 2004 Conference and Exposition [C]. 2004, **2**: 1525—1529
- [6] Rey L, De Chateau Thierry P, Phalippou L, et al. The Radar Altimeter for CryoSat Mission Under Development [A]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [C]. 2002, **3**: 1768—1770.
- [7] Raney R Keith, Porter David L. WITEX: An Innovative Three-satellite Radar Altimeter Concept [A]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [C]. 2000, **7**: 3190—3192
- [8] Sun Y P, Martin Sweeting. Directional Wave Spectrum Estimation by Synthetic Aperture Radar Altimeter [A]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [C]. 2000, **5**: 2340—2342.
- [9] Eva Novony, A P R Cooper. Computer Simulation of Radar Altimetric Waveforms [J]. Int J Remote Sensing, 1991, **12** (1): 125—134.
- [10] Novony E, Cooper A P R, Goman M R. Simulation of Waveforms Returned by Realistic Surfaces [A]. Space Agency [C], (Special Publication) ESA SP, 1984.
- [11] Novony E. Interpretation of Simulated Radar Altimetric Waveforms: Surfaces of Constant Elevation (Sea-ice or Flat Land) [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, **17** (14): 2803—2825.
- [12] Stephen L Durden, John F Veseky. A Physical Radar Cross-Section Model for a Wind-Driven Sea with Swell [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1985, **10** (4): 445—451.
- [13] Dong Q, Guo H D. Ocean Remote Sensing by Synthetic Aperture Radar [M]. Published by Science Publisher, Beijing, 2005. [董庆, 郭华东. 合成孔径雷达海洋遥感 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.]
- [14] Wen S C, Yu Z W. Ocean Wave Theory and Calculation Principles [M]. Published by Science Publisher, Beijing, 1984 [文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.]
- [15] Donegan M A, Pierson W J. Radar Scattering and Equilibrium Ranges in Wind-generated Waves with Applications to Scatterometry [J]. Journal of Geophysical Research, 1987, **92** (5): 4971—5029.
- [16] Xu K. High Resolution Radar Altimeter System Study [D]. Dissertation for Doctor of Chinese Science. Space Science and Applied Research. Chinese Academy of Sciences, 2001. [许可. 高分辨率星载雷达高度计系统研究 [D]. 中国科学院空间科学与应用研究中心博士论文, 2001.]
- [17] Gray S Brown. The Average Impulse Response of a Rough Surface and Its Applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1977, **25** (1): 67—74.