

利用双尺度模型的海浪极化SAR成像模拟

赵志钦, 骆小彦, 聂在平

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】 海浪极化SAR成像模拟对海面散射的研究有重要的意义。该文根据海浪随机理论进行了粗糙海面建模, 利用海面的双尺度模型构造了包含涌浪的随机粗糙海面; 同时考虑了大、小尺度的海面的影响。基于该海面模型, 利用Bragg散射模型和几何光学近似法模拟了不同风速情况下海浪的极化SAR图像, 并对海浪参数及SAR参数对极化图像的影响做了分析, 得出了一些有益于海浪信息提取的结论。

关键词 电磁散射; 成像模拟; 海面散射; 极化SAR; 双尺度模型

中图分类号 TN957

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.05.024

Simulation of Polarization SAR Imaging of Sea Wave Using Two-Scale Model

ZHAO Zhi-qin, LUO Xiao-yan, and NIE Zai-ping

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Simulation of polarization synthetic aperture radar (SAR) imaging of sea wave has great significance on sea surface scattering. According to the theory of random ocean wave, rough ocean surface is modeled in this paper. Random rough ocean surface which contains swell is constructed using the two-scale-model. This treatment takes both the large scale and small scale surface into account. By using the Bragg scattering model and the geometry optical approximation method, polarization SAR images of the modeled ocean surface at different wind speeds are simulated. The effects of the parameters of ocean waves and the parameters of SAR system are analyzed. Finally, some useful conclusions are drawn, which are helpful for extracting the information of ocean surface.

Key words electromagnetic scattering; imaging simulation; ocean surface scattering; polarization SAR; two-scale-model

海浪的监测和研究对海浪的预报、海洋目标的检测、海岸的侵蚀等具有十分重要的意义。传统的海洋监测手段如岸基观测站、船只、浮标等都存在很多不足之处。海洋遥感技术具有高空飞行、大范围的测量以及定时重复观测等特点, 弥补了传统测量方法的不足。在所有的海洋遥感技术中, 合成孔径雷达(SAR)具有其独特的优势, 即全天时、全天候和高分辨率的特点, 能够大范围地观测海浪状态, 已越来越成为监测和研究海浪的强有力工具^[1-2]。

SAR是一种主动式微波成像雷达, 发射一定频率的微波, 通过测量后向散射信号的幅值以及相位信息, 可以得到海面后向散射强度的图像, 这种图像的分辨率很高, 可以用于海面细微空间变化的特征提取。

海浪成像的计算机模拟对海洋遥感机理研究、海洋遥感设计、海洋信息获取等具有十分重要的意义, 在硬件条件受限和实测资料缺乏的情况下, 计

算机模拟是一种更灵活的手段, 它为系统的设计提供正确的参考和指导。SAR图像的模拟通常有基于回波成像的原始信号模拟^[3-4]和面向SAR图像的功能模拟两种方法。本文采用的是第二种方法, 主要基于海面模型、电磁散射模型以及海面成像机制等理论模型进行图像模拟。但在海面模拟时同时考虑了风浪与涌浪, 因此接近真实的情况。

1 构造随机海面

海浪通常指风浪与涌浪, 海面波通常比较复杂, 高低长短不齐、杂乱无章、此起彼伏、瞬息万变, 因而海浪具有明显的随机性, 难以用确定的函数来描述。研究人员已将多数振幅、频率、相位、方向不同的简单波动叠加起来以代表海浪, 这种模型适用于反映海浪的随机性。该研究方法已被证明是有效的, 成为研究海浪的主要手段。本文采用基于双

收稿日期: 2009-06-11

基金项目: 国家863计划(2007AA12Z159), 总装预研基金(9140A03020107DZ0210), 新世纪优秀人才支持计划

作者简介: 赵志钦(1969-), 男, 博士, 教授, 主要从事微波遥感理论及应用、计算电磁学、微波致热超声成像等方面的研究。

尺度电磁散射模型的模拟方法,为简单起见忽略了体散射的影响。实际上,由于电磁散射的特点,在高频情况下(如GHz量级),电磁波的穿透深度非常有限,海面散射完全可以近似成只有面散射。

1.1 模拟海面原理

本文采用双尺度海面波模型,将海面波谱根据不同波长尺度分为两个区域^[5]。短波体现为布拉格(Bragg)散射波,由连续谱产生;长波体现为本地切平面(即小平面),轮廓为正弦曲线型。因此,模拟的海面由大尺度结构的长波和小尺度结构的短波叠加而成。

粗糙海面是在海面风、海水的重力和海水表面的张力的相互作用下形成的,这种相互作用是非线性的;电磁波照射到海面后,电磁波与海面的相互作用也是非线性的;因此,采用非线性的理论和方法研究电磁波与海面的相互作用更能反映其物理本质。考虑到长波与短波之间的非线性作用,即长波相位调制短波的幅度,分为汇聚区和发散区,在长波波峰附近小波波动的振幅增加,而波谷附近小波波波动振幅减小。文献[6-7]给出了一种近似描述该非线性作用的方法,将海面的轮廓表示为:

$$z(x, y) = z_0 + \delta_x(x - x_0) + \delta_y(y - y_0) + (1 + z_0 k_0) z_s(x, y) \quad (1)$$

式中 (x_0, y_0, z_0) 为长波面元中心的坐标; δ_x 和 δ_y 分别为面元的坡度; $z_s(x, y)$ 为短波的轮廓; k_0 为长波波数。

短波的频谱采用二维的pierson-moskowitz (PM) 谱^[8],该谱是根据观测资料进行分析得到的无因次谱。大量的海面数据的统计表明,PM谱可以很好地表征真实的海面波谱,并已得到了广泛的应用。PM谱的分布为:

$$W_2(K) = \frac{\alpha}{8\pi|K|^4} \exp\left[\frac{-\beta g^2}{K^2 U^4}\right] \quad (2)$$

式中 $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$; $\beta = 0.74$; g 为重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; U 为距平均海平面19.5 m高度的风速; K 为海表面波的空间波数。

用PM谱产生短波的具体流程如图1所示,海面高度的数据由均值为1的高斯白噪声确定,该噪声通过一个传递函数由式(2)确定的滤波器,最终生成的海面的均方根高度由风速决定。对于二维的情况,在波数域的傅里叶变换中 X 方向的采样间隔为 $2\pi/N_x \Delta_x$, Y 方向的采用间隔为 $2\pi/N_y \Delta_y$, 其中 Δ_x 、 Δ_y 为空间域的采样间隔; N_x 、 N_y 为采样点数。

离散的波数范围为 $-\pi/\Delta_x < K_x \leq \pi/\Delta_x$,

$$\pi/\Delta_y - < K_y \leq \pi/\Delta_y。$$

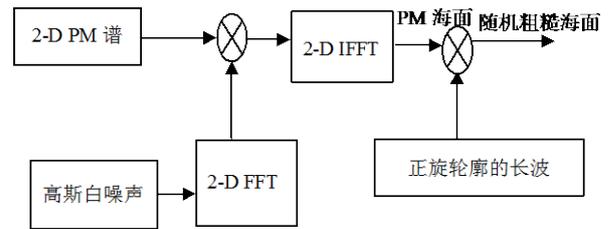


图1 粗糙海面的形成流程

用PM谱产生的短波图像如图2所示,波面上方风速为3 m/s,模拟时的划分间隔为1/6信号波长。

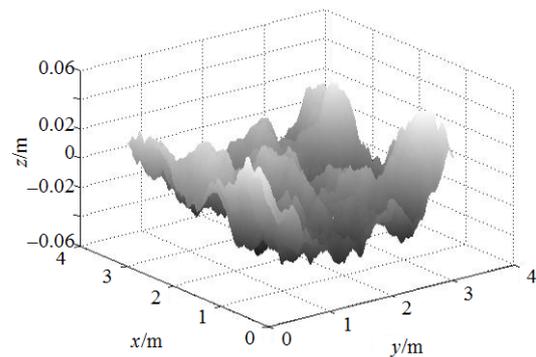


图2 用PM谱产生的短波

1.2 粗糙海面的数值模拟

在海面研究中,通常用正弦波模型来模拟重力波产生的海面,本文采用该方法来模拟大尺度的海面。在模拟时将海面化分成若干三角形切平面,计算出与采样点相关的三角网格面元的中心坐标,同时利用PM谱产生短波,该短波对于不同的采样点呈现随机性。根据海面轮廓的描述式(1),可以得到三角面元中心点对应的海面高度;通过加权平均的方式计算出各采样点的海面高度值;并利用这些海面高度值构造出随机粗糙海面。

根据上述方法,本文模拟了某时刻包括涌浪的海面,模拟的海面面积为300 m×300 m,传播方向与雷达方位向夹角为60°。

2 极化SAR图像的模拟

本文针对SAR图像的功能模拟,其特征主要由模拟区域特征和SAR的成像参数和成像模型所决定。根据电磁波的散射原理对海浪SAR图像进行仿真,SAR图像强度由后向散射电场强度决定。根据合成表面散射模式,总的后向散射能量等于分布在长波不同相位上的面元所散射的能量总和。可以将海表面假定为是有限个粗糙面元的叠加,通过计算小面元的后向散射值得到分辨单元的后向散射值。

这些小面元需具有以下的特点:(1) 每个面单元均与实际平面正切;(2) 尺寸为1/6波长, 根据通常计算电磁学的仿真分析, 这样的尺寸能保证较好的精度;(3) 空间几何参数由其中心位置矢量和法矢量确定;(4) 其电磁散射特性是表面粗糙度和物质电磁参数的函数。

2.1 后向散射电场的计算

首先把目标分割成一个个三角形网格, 其尺寸相对分辨单元足够小, 即每个分辨单元包括若干个这样的网格。如果小面元满足上述要求, 就可以假定每个分辨单元的后向散射电场强度是散射小平面对应的平均散射, 而且小平面对统计独立。下面计算单个矩形网格面的后向散射电场强度。

入射电场矢量为:

$$\mathbf{E}_i = \hat{\mathbf{e}} E_0 \exp(-j\mathbf{K} \cdot \mathbf{R}) \quad (3)$$

式中 \mathbf{K} 为入射波的传播向量; $\hat{\mathbf{e}}$ 为单位极化向量; E_0 为入射电场的幅度, 在不影响仿真分析情况下, 令 $E_0 = 1$; \mathbf{R} 为从传导天线的相位中心到小面的距离向量。

对于极化SAR, 雷达入射电场向量 \mathbf{E}_i 、目标散射电场向量 \mathbf{E}_s 和散射矩阵[S]之间满足以下关系^[9]:

$$\mathbf{E}_s = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{E}_i \quad (4)$$

由海面Bragg散射模型^[10]可得:

$$S_{hh} = \frac{\cos \phi - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \phi}}{\cos \phi + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \phi}} \quad (5a)$$

$$S_{vv} = \frac{(\varepsilon - 1)(\sin^2 \phi - \varepsilon(1 + \sin^2 \phi))}{(\varepsilon \cos \phi + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \phi})^2} \quad (5b)$$

式中 ε 为目标的相对介电常数; ϕ 为本地入射角; h和v分别代表水平和垂直极化。对于Bragg模型, 海面的后向散射交叉极化远小于同极化^[11]。在C波段, 取 $\varepsilon = 66.81 - 33.17i$ 。

2.2 SAR图像的数值仿真

根据上述分析, 产生SAR模拟图像的流程描述如下:

- (1) 确定三角形网格面, 即按等方位线, 散射目标表面逐渐远离雷达。
- (2) 计算分辨单元内各网格中心点的海面波高。
- (3) 根据本文所述的原理, 计算单个三角形网格面的散射矩阵。

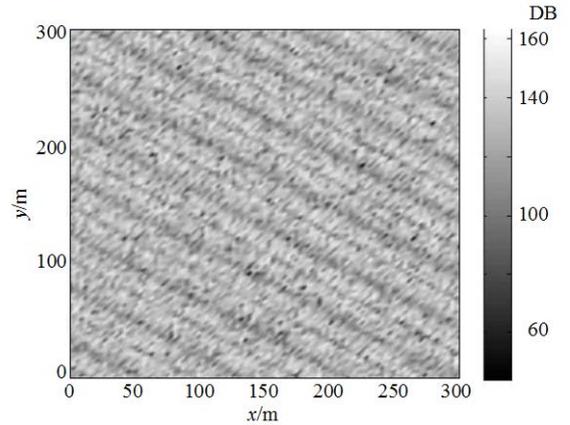
(4) 计算一个分辨单元内的后向散射电场值, 假设一个分辨单元内有 m 个三角形网格面, E_{sk} 为第 k 个网格面的后向散射电场, 则该分辨单元的后向散射电场值为 $(E_{s1} + \dots + E_{s2} + \dots + E_{sm})/m$ 。

模拟采用的SAR平台的参数如表1所示。

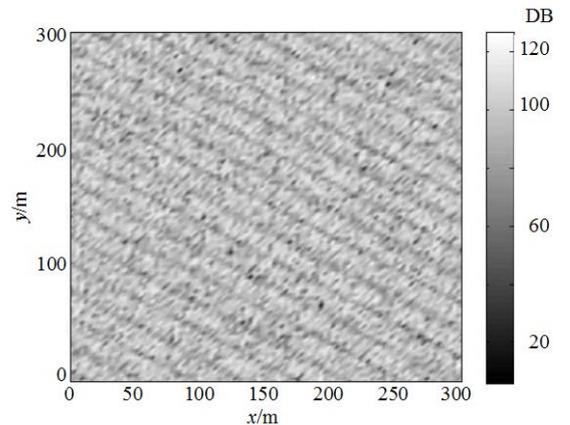
表1 模拟时采用的主要的SAR参数

雷达频率/ GHz	平台高度 /km	平台飞行 速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	雷达视角(场 景中心)/ $^\circ$	分辨率(距离向 \times 方 位向)/m
5.3	8	231.5	45	3 \times 3

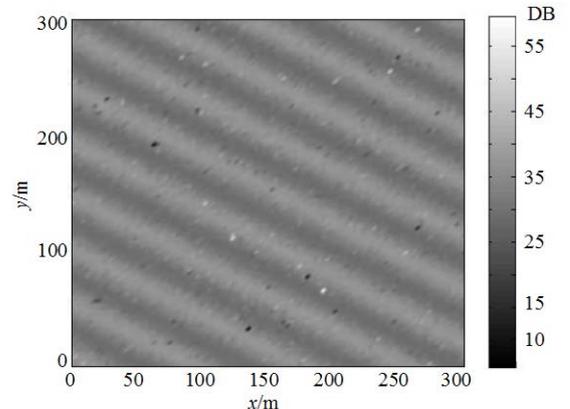
下面给出不同风速情况下模拟得到的SAR图像: 如图3所示为风速2 m/s、长波波高0.5 m、波长为40 m时的SAR图像; 如图4所示为风速3 m/s、长波波高0.35 m、波长为40 m时的SAR图像; 如图5所示为风速6 m/s、长波波高0.5 m、波长为30 m时的SAR图像。



a. vv极化强度图

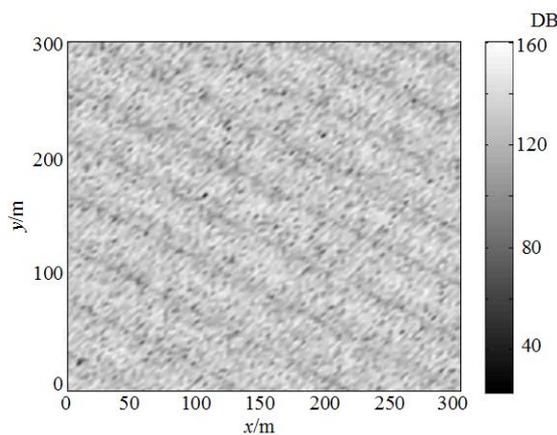


b. hh极化强度图

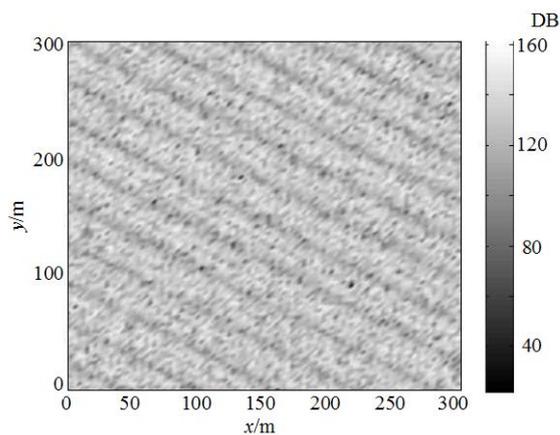


c. vv与hh比值强度图

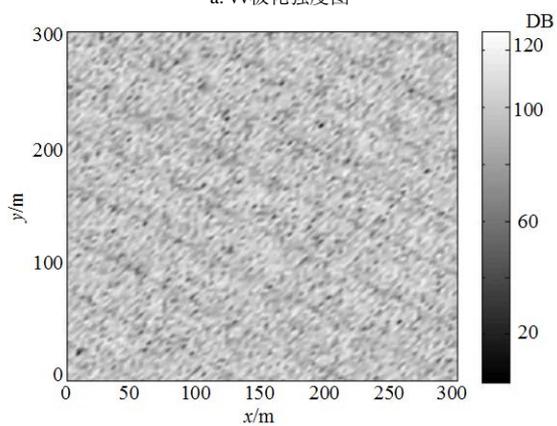
图3 风速2 m/s、长波波高0.5 m、波长为40 m时的SAR图像



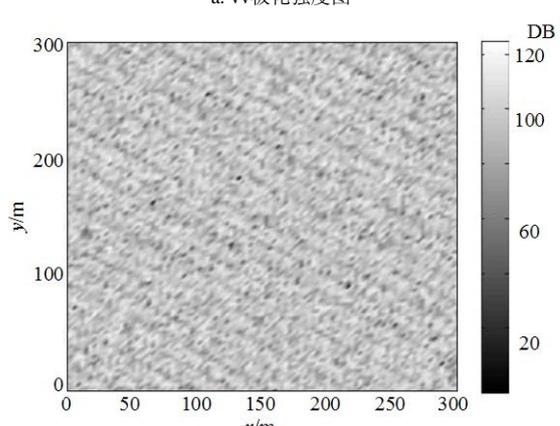
a. vv极化强度图



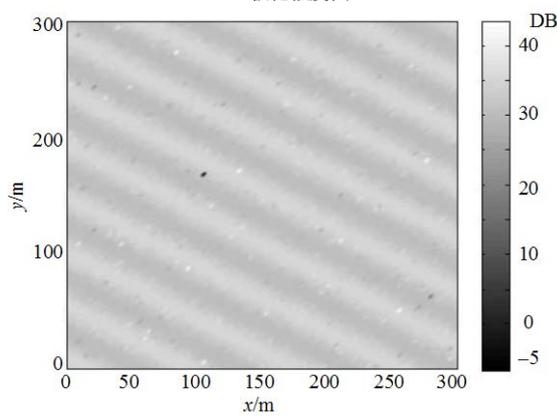
a. vv极化强度图



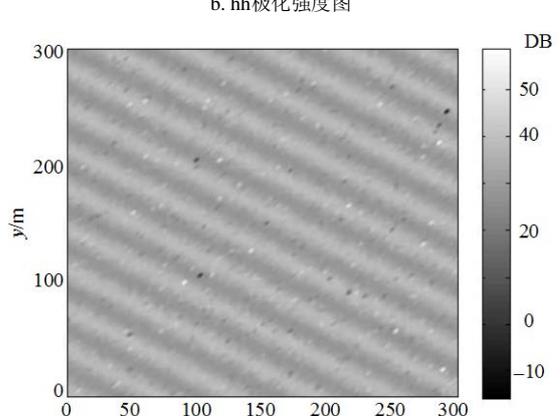
b. hh极化强度图



b. hh极化强度图



c. vv与hh比值强度图



c. vv与hh比值强度图

图4 风速3 m/s、长波波高0.35 m、
波长为40 m时的SAR图像图5 风速6 m/s、长波波高0.5 m、
波长为30 m时的SAR图像

通过对这些图像的分析 and 比较,可以得到如下结论:

(1) 垂直极化(vv)比水平极化(hh)的强度大,与通常粗糙海面的散射结论是一致的。

(2) 其他参数一定,不同风速间vv或hh极化其峰值变化不明显,而vv和hh比值变化明显;风速增大,SAR图像粗糙度增强。

(3) 其他参数一定,随着波高的增大,vv和hh极化的散射电场峰值基本不变,图像明暗程度变深,相邻点相干性变弱。

(5) 其他参数一定,波长变小时,vv极化图像强度变小,hh极化图像强度变大,vv与hh极化的比值变小,模拟的SAR图像更清晰。在40 m波长时,比值主要集中在4~7;在30 m波长时,比值主要集中在2~3.5。

(6) vv与hh的比值强度图能更好地反映海浪信息,更有利于海浪信息的提取。根据这一特点,可以通过vv和hh比值来反演海面的粗糙度,比单纯利用vv或hh的值来反演海面的粗糙度更准确。

3 结束语

本文研究了随机粗糙海面模型的建立以及海浪极化SAR图像的模拟,讨论了海浪参数对SAR图像的影响。随机海面的模拟基于双尺度模型,其中小尺度波的随机性体现了在一定风速下的随机海面特征,这种处理更接近真实的情况。通过对海面高度函数的修正,体现了海面对SAR的成像调制机制。本文模拟SAR图像的方法依赖于环境参数和SAR系统参数,主要是根据随机粗糙海面模型、电磁散射模型、海面SAR调制机制得到,无须计算SAR信号的原始数据,避免了原始数据的复杂处理。仿真结果证明了该方法的有效性。本文为今后的多尺度海面信号的SAR图像模拟提供了参考;并且通过对不同风速情况下模拟得到的SAR图像分析,得到的结论对海浪信息的提取提供了有益的参考。

参 考 文 献

- [1] OLIVER C, QUEGAN S. Understanding synthetic aperture radar image[M]. London: Artech House, 1998.
- [2] 郭华东, 邵 芸, 王长林, 等. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
GUO Hua-dong, SHAO Yun, WANG Chang-lin. Theories and application of radar for earth observation[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [3] 赵志钦, 王建国, 黄顺吉. 合成孔径雷达的点目标模拟研究[J]. 电子科技大学学报, 1999, 5(28): 471-474.
ZHAO Zhi-qin, WANG Jian-guo, HUANG Shun-ji. Research of simulation of synthetic aperture radar[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1999, 5(28): 471-474.
- [4] FRANCESCHETTI G, MIGLIACCIO M, RICCIO D. On ocean SAR raw signal simulation[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(1): 84-100.
- [5] JOHNSON J T, SHIN R T, KONG J A, et al. A numerical study of the composite surface model for ocean backscattering[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(1): 72-83.
- [6] FRANCESCHETTI G, MIGLIACCIO M. Concepts for an efficient SAR ocean simulator[C]//Proc of the IEEE Int Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'92). Houston, USA: IEEE, 1992.

- [7] FRANCESCHETTI G, MIGLIACCIO M, RICCIO D. SAR raw signal simulation of oil slicks in ocean environments[J]. IEEE Trans on Geoscience Remote Sens, 2002, 40(9): 1935-1949.
- [8] THORSOS E I. Acoustic scattering from a "Pierson-Moskowitz" sea[J]. J Acoust Soc Am, 1990, 88(1): 335-349.
- [9] 皮亦鸣, 杨建宇, 付毓生, 等. 合成孔径雷达成像原理[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2007.
PI Yi-ming, YANG Jian-yu, FU Yu-sheng, et al. Principles of synthetic aperture radar[M]. Chengdu: Press of University of Electronic Science and Technology of China, 2007.
- [10] 刘良明. 卫星海洋遥感导论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
LIU Liang-ming. Introduction to satellite oceanic remote sensing[M]. Wuhan: Press of Wuhan University, 2005.
- [11] 董 庆, 郭华东. 合成孔径雷达海洋遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
DONG Qing, GUO Hua-dong. Synthetic aperture radar remote sensing of ocean[M]. Beijing: Science Press, 2005.

编 辑 税 红



赵志钦, 教授, 博士生导师。于1990、1993年和1996年毕业于电子科技大学, 分获电子工程专业学士学位、信号与信息处理专业硕士学位及通信与电子系统专业工学博士学位。2002年获美国Oklahoma State University电机工程专业博士学位。2003年1月至2006年3月在美国Duke University应用遥感研究中心先后作为Post-doc、Research Associate和Research Scientist从事研究工作。

已在IEEE Trans. on AP、GRS、SIAM、JCP等国内外重要刊物和会议上发表论文100余篇, 其中60余篇被SCI、EI和ISTP检索。研究领域涉及电磁场与微波技术专业、信号与信息处理专业。主要研究内容包括雷达信号处理、计算电磁学、微波遥感理论及应用、微波致热超声成像等。目前承担的项目有国家自然科学基金项目、863项目、总装基金项目等。

赵志钦是IEEE高级会员, 美国Phi Kappa Phi荣誉协会会员, 2006年获得“教育部新世纪优秀人才支持计划”。