

文章编号: 2095-4980(2019)01-0053-05

## 基于 Walsh 归一化函数法的 HF 雷达海面探测

张建军

(大连工业大学 信息科学与工程学院, 辽宁 大连 110320)

**摘要:** 用 Walsh 归一化函数法描述高频地波雷达海面 Bragg 散射原理的物理过程简单、清晰并广为接受。概述 Walsh 归一化函数法的基本原理以及利用该方法获取高频雷达单基地、双基地脉冲和调频连续波(FMCW)波形截面图、一阶 Bragg 尖峰随机扰动分析等方面的主要成果, 指出这些成果的主要应用场景和优势, 并对进一步研究、开发的前景予以简单介绍。

**关键词:** 高频雷达; Bragg 散射; 归一化函数法; 散射截面图

**中图分类号:** TN958.93

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201901.0053

## HF radar ocean surface observation with Walsh's generalized function method

ZHANG Jianjun

(School of Information Science and Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian Liaoning 110320, China)

**Abstract:** Walsh's generalized function method has illuminated its concision and distinction in the description of the Bragg scatter mechanism and been well accepted around the world in the field of High Frequency(HF) electromagnetic wave scattering over the ocean surface. The foundation theory of the generalized function method is outlined. The first-and second-order HF radar cross sections are depicted with monostatic and bistatic operations, along with the pulsed and Frequency Modulated Continuous Wave(FMCW) radar waveforms. Some front edge results are discussed, such as the statistical properties of the first-order Bragg fluctuations with their possible applications and superiority in solving the practical problems. The prospect of further research and development is pointed out as well.

**Keywords:** High Frequency radar; Bragg scatter; generalized function method; scattering cross section

国家海洋战略的推进, 海洋的开发、利用以及权益的捍卫, 对海洋观测手段提出了更高要求。高频(HF)(3~30 MHz)频段电磁波具有与海面重力波相近的波长, 能够通过趋肤效应沿海水形成的波导在弯曲的地球表面实现超视距传播。高频地波雷达可以对 0~400 km(>200 n mile)范围的水面以下 30 m, 水面至水面以上 100 m 高度内的移动目标(舰船、潜艇、直升机、反舰导弹等)以及海态(海流、海浪、海面风)实施全天候、大范围、实时、连续探测。高频雷达的探测只与目标尺度有关, 因此具有反隐身潜力; 能为精确跟踪、锁定目标以及引导火力打击提供依据, 减少微波雷达的盲目性开机时间。

1955 年, Crombie<sup>[1]</sup>通过实验揭示了电磁波与海面重力波之间的相互作用, 即 Bragg 散射原理。根据这一原理, 当雷达波入射角为 90° 时, 散射波中波长恰好为入射波波长一半的分量被加强。由于不同波长的水面重力波移动速度不同, 因此在雷达回波多普勒谱的特定对称位置出现峰值, 即 Bragg 一阶谱。2 个一阶重力波合成, 或电磁波经过 2 次反射后具有一半的入射波波长, 则散射回波形成连续的二阶多普勒谱。高阶多普勒谱也存在, 但在回波能量中可以忽略。Bragg 散射构成了高频雷达回波中海杂波的主要成分, 海杂波影响雷达目标探测的效果, 因此需消除或减小海杂波的干扰, 这是最早研究海杂波机理的出发点。Bragg 散射原理的发现与研究, 使得高频雷达可用来获取海面流、浪、风等海态信息, 最终促成了“物理海洋学”的诞生。

电磁波在具有良好导电性、时变、粗糙面上的散射是无线电传播的经典问题, 雷达散射截面图模型是目标探测和海态信息获取的基础。20 世纪 70 年代, Barrick 拓展 Rayleigh 的微扰法, 引入“有效表面阻抗”概念, 得到高频雷达一阶和二阶截面图的数学模型<sup>[2-4]</sup>。在该模型里, 一阶谱线尖峰由 2 个对称的、无限窄的冲激(Delta)函数来表示。通常在使用 Barrick 截面图模型时, 一阶谱线尖峰的宽度被解释为外界自然和人为噪声的结果<sup>[5]</sup>。

20 世纪 80 年代, Walsh 及其同事基于归一化函数法研究这一问题<sup>[6-9]</sup>。Walsh 截面图模型将一阶谱线尖峰描述为具有一定宽度的抽样函数的平方。理论上, 当发射波的脉冲宽度趋向无穷大, 抽样函数趋近于 Delta 函数, 一阶谱线尖峰的宽度也趋向零, 等效于 Barrick 截面图模型。

Walsh 的归一化函数法在学术界得到广泛认可, 并在应用领域获得巨大成功。如基于 Walsh 模型可推导出单基地和双基地高频雷达截面图、调频连续波(FMCW)和调频中断连续波(Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave, FMICW)等不同发射波形或波形组合的截面图、雷达置于摇曳平台(舰船或半固定钻井平台)上的多阶截面图<sup>[10-11]</sup>, 研究海面与电离层混合路径的传播<sup>[12]</sup>, 以及对海面随机扰动的分析等<sup>[13-17]</sup>。本文简单综述该方法的研究成果, 并对其应用场景和优势予以展望。

## 1 归一化函数法

### 1.1 基本方程

归一化函数法将整个散射平面做统一考虑<sup>[6]</sup>, 如图 1 所示。在散射面不同媒质交界处, 将上下媒质的介电常数和电导率统一在一个表达式内, 通过直接求解麦克斯韦方程组得到散射波方程。归一化函数法和微扰法的分析思路完全不同, 且由于整个分析过程没有预设前提条件, 使其普遍适用于各种频段、波形的电磁波在各种媒质界面的传播、散射和折射。一旦发射源和媒质条件确定, 就可求解得到最终结果。

图 1 所示 2 种媒质交汇的两维平面  $\xi(x, y)$ , 磁导率在上下介质中保持一致( $\mu=\mu_0$ ), 介电常数  $\varepsilon$  和电导率  $\sigma$  分别表示为:

$$\begin{cases} \varepsilon=\varepsilon_0 h+\varepsilon_1(1-h) \\ \sigma=(1-h)\sigma_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $h$  为 Heaviside 方程。整个空间电场强度  $\mathbf{E}$  的上下两部分可统一表示为:  $\mathbf{E}=\mathbf{hE}+(1-h)\mathbf{E}$ , 其基本表达式为:

$$\nabla^2 \mathbf{E}+\gamma_0^2 \mathbf{E}=\frac{\eta_r^2-1}{\eta_r^2} \nabla[\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}^++\delta(z-\xi)]-T_{sE}(\mathbf{J}_s) \quad (2)$$

式中:  $\gamma_0^2=k^2[h+(1-h)\eta_r^2]$ ;  $k^2=\omega_2\mu_0\varepsilon_0$ ;  $\eta_r^2=\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}+\frac{\sigma_0}{j\omega\varepsilon_0}$  为下面媒质折射系数的平方;  $\mathbf{n}=-\frac{\partial\xi}{\partial x}\mathbf{x}-\frac{\partial\xi}{\partial y}\mathbf{y}+\mathbf{z}$ ,  $\mathbf{n}$  沿着  $z$  的正向垂直于  $z=\xi(x, y)$ ,  $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$  是单位矢量;  $T_{sE}=\frac{1}{j\omega\varepsilon_0}[\nabla(\nabla\cdot)+k^2]$  为电流源操作因子;  $\mathbf{J}_s$  为任意源电流密度, 位于  $z=\xi(x, y)$  面上;  $\mathbf{E}^+(x, y)=\lim_{z\rightarrow\xi(x, y)^+}\mathbf{E}(x, y, z)$ ,  $\mathbf{E}^+$  是  $\xi$  面上的  $\mathbf{E}$  值。

求解公式中的  $\mathbf{E}$  可得到 3 个微分方程, 分别为: 分界面上方的电场方程, 分界面下方的电场方程以及用于在分界面规范电场的方程。

归一化函数法求解得到的海面散射信号场强  $\mathbf{E}_0^+$  表达式<sup>[6-7]</sup> 为:

$$\left(\mathbf{E}_0^+\right)_1=\frac{k_0 C_0}{(2\pi)^{3/2}} \sum_{K, \omega} P_{K, \omega} \sqrt{K} e^{j\rho \cdot K} \int_{\rho_0} \frac{F^2(\rho_0)}{(\rho_0)^{3/2}} e^{jK\rho_0} e^{-j2k_0\rho_0} e^{-j\pi/4} G(\theta) d\rho_0 \quad (3)$$

式中:  $k_0$  为雷达入射波波数;  $C_0$  为双极振子常数;  $P$  为海面参数分量, 随海面重力波的波数  $K$  和角频率  $\omega$  变化;  $F$  为 Sommerfeld 衰落参数;  $\rho_0$  为距离变量;  $G(\theta)$  为接收天线方向性函数, 对于窄波束接收天线取值一般为 1。

### 1.2 一阶和二阶截面图

代入良好导电性、时变、粗糙表面的条件求解式(3), 得到单基地高频地波雷达一阶散射截面图公式<sup>[8]</sup>:

$$\sigma_1(\omega_d)=2^4 \pi k_0^2 \sum_{m=\pm 1} S(mK) \frac{K^2}{\sqrt{g}} \Delta\rho \sin c^2\left[\frac{\Delta\rho}{2}(K-2k_0)\right] \quad (4)$$

式中:  $\omega_d$  为多普勒角频率;  $S(mK)$  为海面重力波方向谱;  $g$  为重力加速度;  $\Delta\rho$  为散射区的径向宽度,  $\Delta\rho=\frac{c}{2B}$ ,

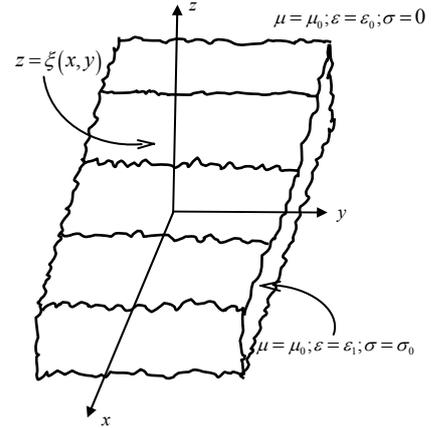


Fig.1 Rough surface in Walsh's generalized function method

图 1 Walsh 归一化函数法使用的粗糙表面

$c$  为光速,  $B$  为发射带宽;  $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$  为抽样函数。Walsh 的单基站二阶散射截面图公式为:

$$\sigma_2(\omega_d) = 2^3 \pi k_0^2 \Delta \rho \sum_{m_1=\pm 1} \sum_{m_2=\pm 1} \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi \int_0^\infty S(m_1 K_1) S(m_2 K_2) |{}_s \Gamma|^2 K^2 \times \text{sinc}^2 \left[ \frac{\Delta \rho}{2} (K - 2k_0) \right] \delta(\omega_d + m_1 \sqrt{gK_1} + m_2 \sqrt{gK_2}) K_1 dK_1 d\theta_{K_1} dK \quad (5)$$

式中:  ${}_s \Gamma$  是水波之间、水波与电磁波之间的耦合参数;  $\delta$  是 Delta 函数;  $K_1$  和  $K_2$  分别是两次散射波的波数,  $\theta_{K_1}$  是  $K_1$  的主方向; 二阶是指水波之间的耦合和水波与电磁波之间的耦合<sup>[18-19]</sup>。

图 2 为基于式(4)~(5)得到的高频雷达单基地的散射截面图仿真。发射频率为 21.7 MHz, 带宽为 50 kHz, 海面风速为 15 m/s, 垂直于雷达入射波方向; 海面风掀起的重力波完全发展, 采用 Pierson-Moskowitz 模型<sup>[20]</sup>和归一化方向谱; 深水条件, 海流速度为零。一阶散射截面图的最大值出现在多普勒谱  $\pm \frac{1}{2\pi} \sqrt{2gk_0} \approx \pm 0.47$  Hz 的位置。

双基地高频雷达一阶和二阶散射截面图与式(4)和(5)的主要差别在于抽样函数变为  $\text{sinc} \left[ \frac{\Delta \rho}{2} \left( \frac{K}{\cos \phi} - 2k_0 \right) \right]$ , 其中  $\phi$  是双基地角<sup>[9,13-14]</sup>。一阶最大值出现在  $\pm \frac{1}{2\pi} \sqrt{2gk_0 \cos \phi}$  Hz。

当双基地角  $\phi = 0^\circ$  时, 则等同于单基地; 随着  $\phi$  增加, 即收发站址之间距离增加, 则截面图整体向零多普勒位置收缩。

一阶多普勒谱正负极值的理论位置由雷达入射波的波长唯一确定。如果水面海浪运动叠加了海流的运动, 会造成一阶多普勒谱极值的偏移, 这一偏移可用来测量海流沿着雷达入射波方向的速度分量。通过反演二阶多普勒谱可获取海面风场和海浪波数谱。在进行海面移动目标的探测时, 则要将上述回波当作海杂波予以抑制或消除。

双基地高频雷达同样能得到海态信息<sup>[15]</sup>, 发现、跟踪从浅海到低空的移动目标, 还具有战场生存能力强、组网覆盖节省发射单元数量等优点。

### 1.3 使用 FMCW 波形的截面图

上述截面图公式中使用的发射波形是矩形脉冲, 而实际应用中雷达更多使用调频波, 如 FMCW 和 FMICW。用 Walsh 方法求解的 FMCW 波形的海面散射截面图<sup>[16]</sup>与脉冲波形相比, 是将抽样函数的平方换为  $\Delta \rho S m^2 [K, k_B, \Delta_r]$ , 其中  $\Delta_r$  是积分范围,  $S m [K, k_B, \Delta_r] = \frac{1}{\pi} \{ Si[(K - 2k_0 + k_B)\Delta_r] - Si[(K - 2k_0 - k_B)\Delta_r] \}$ ,  $Si(\cdot)$  是正弦积分函数,  $Si(x) = \int_0^x \frac{\sin(t)}{t} dt$ 。图 3 为相同条件下 FMCW 波形与脉冲波形一阶散射截面图的对比, 发射频率为 25 MHz; FMCW 波形的扫描带宽为 500 kHz, 扫描间隔 0.5 s;  $\Delta_r = 0.5 \Delta \rho = 300$  m, 与脉冲波形对应的散射区宽度一致。从中可以看出, FMCW 波形的一阶散射截面图主瓣收窄, 旁瓣有显著衰落。

### 1.4 随机扰动现象的研究

所有的现有模型都成功描述了多普勒谱中 Bragg 一阶谱线尖峰的理论位置, 但比较大量实际观测结果和理论值时, 人们发现实际观测到的 Bragg 一阶谱线的尖峰存在随机扰动<sup>[5]</sup>。图 4 是德国 WERA 雷达在同一散射区域

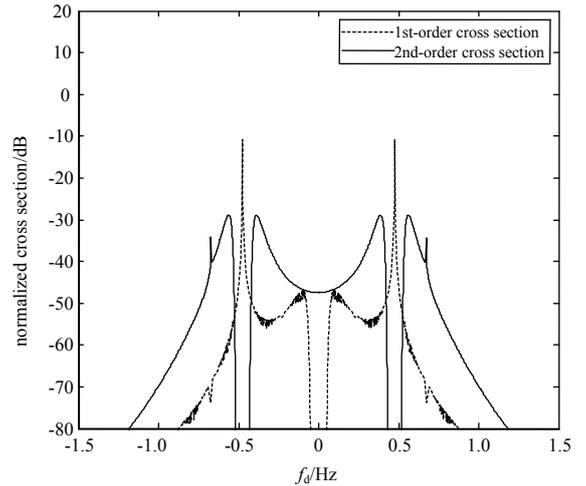


Fig.2 Monostatic HF radar the 1st- and the 2nd-order cross sections based on Walsh's method

图 2 基于 Walsh 法的单基地高频雷达一阶和二阶散射截面图

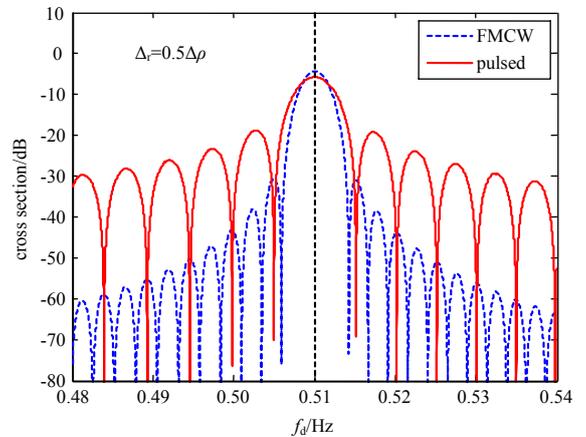


Fig.3 Comparison of scattering 1st-order cross sections between FMCW and pulsed waveforms

图 3 FMCW 波形与脉冲波形的一阶散射截面图对比

内的 4 个时间连续多普勒谱, 图(b)是图(a)中负多普勒一阶谱线附近的放大, 各色竖线标定了不同谱线重心的位置, 该重心位置的变化证实了随机扰动的发生<sup>[17]</sup>。随机扰动将影响海面探测的准确度<sup>[21]</sup>。

根据 Walsh 截面图模型, 海面特定散射区域的径向宽度由发射信号的带宽决定, 较大的发射带宽对应了较宽的抽样函数的主瓣, 进而导致了较窄的散射区域。散射区域的宽度就是雷达的空间分辨力。采用增加发射信号带宽的方法可提高雷达的空间分辨力, 但如果一味地提高发射信号的带宽, 将造成抽样函数的主瓣变宽, 使海面的随机变化和噪声乘虚而入, 从而降低捕捉、跟踪海面目标的准确性。一阶谱线随机扰动的机理为高频雷达在频率选择、波形设计等方面提供了理论依据<sup>[17]</sup>。

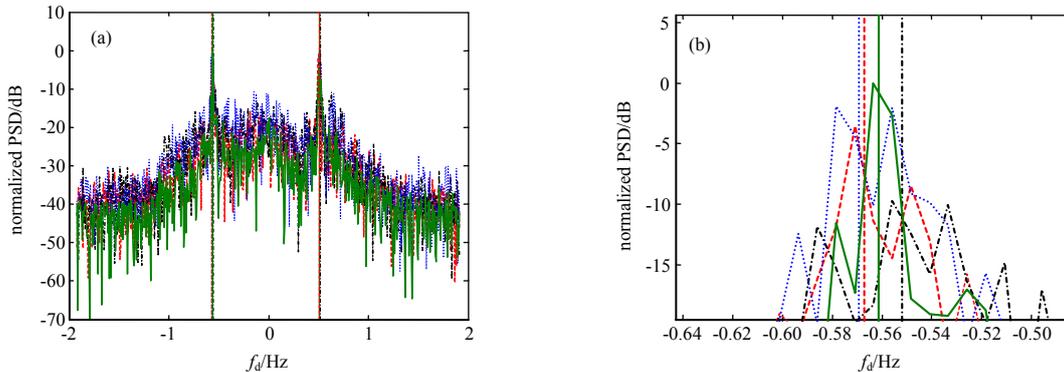


Fig.4 Fluctuations of the Bragg peaks for WERA data. Plot(b) is an expanded view of the plot(a) Bragg regions  
图 4 WERA 雷达实际观测到的 Bragg 尖峰随机扰动。图(b)是图(a)中 Bragg 区域的放大

## 2 结论

归一化函数法普遍适用于描述各种频段、波形的电磁波在各种媒质界面的物理过程。针对高频地波雷达海面散射问题, Walsh 归一化函数法相比于 Barrick 以及其他方法对 Bragg 散射的物理过程的描述更加准确, 理论的可扩展性与实际应用效果更突出。主要成果包括单基地、双基地、FMCW 波形、摇曳平台的截面图获取, 以及随机扰动现象的分析等, 在实际应用中能够改进现有的海杂波抑制算法, 有效缩短相干积累时间, 降低虚警率, 提升发现和跟踪海面、低空、水下移动目标的准确性。研究随机扰动的机理有助于雷达工作频率的选择、波形的设计等, 是高频雷达系统建设、工作过程中需要研究的具体问题。

高频地波雷达可根据需要, 部署在岸边、岛礁、固定或半固定平台以及中大型舰船上, 实现重要目标的防御性探测, 满足军民应用和科研发展需要, 可产生显著的社会和经济效益, 是构建“国家海洋观测信息基础设施”的支撑性技术手段。

### 参考文献:

- [ 1 ] CROMBIE D D. Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc./s[J]. Nature, 1955(175):681-682.
- [ 2 ] BARRICK D E. Theory of HF and VHF propagation across the rough sea, 1 and 2[J]. Radio Science, 1971,6(5):517-533.
- [ 3 ] BARRICK D E. First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1972,20(1):2-10.
- [ 4 ] BARRICK D. Remote sensing of sea state by radar[C]// Ocean 72-IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment. Newport,RI,USA:IEEE, 1972:186-192.
- [ 5 ] DAWE B J. Radio wave propagation over the earth:field calculations and an implementation of the roughness effect[D]. Newfoundland,Canada:Memorial University of Newfoundland, 1988.
- [ 6 ] WALSH J. On the theory of electromagnetic propagation across a rough surface and calculations in the VHF region(OEIC Report N00232)[R]. Memorial University of Newfoundland, 1980.
- [ 7 ] SRIVASTAVA S. Analysis of HF scattering from an ocean surface:an alternative approach incorporating a dipole source[D]. Newfoundland,Canada:Memorial University of Newfoundland, 1984.
- [ 8 ] WALSH J,HOWELL R,DAWE B. Model development for evaluation studies of ground wave radar(Contract Report 90-C14, Prepared for Department of National Defence,Government of Canada,DSS Contract Number W7714-8-5655/01-SS)[R]. Centre for Cold Ocean Resources Engineering,Memorial University of Newfoundland, 1990.
- [ 9 ] WALSH J,DAWE B. Development of a model for the first-order bistatic ocean clutter radar cross section for ground wave

- radars(Contract Report 90-C14, Prepared for the Defence Research Establishment Ottawa, Department of National Defence, Government of Canada, DSS Contract Number W7714-1-9565/01-ST)[R]. Northern Radar Systems Limited, 1994.
- [10] WALSH J, HUANG W, GILL E W. The first-order high frequency radar ocean surface cross section for an antenna on a floating platform[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(9):2994-3003.
- [11] WALSH J, HUANG W, GILL E W. The second-order high frequency radar ocean surface cross section for an antenna on a floating platform[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(10):4804-4813.
- [12] WALSH J, GILL E W, HUANG W, et al. On the development of a high-frequency radar cross section model for mixed path ionosphere-ocean propagation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(6):2655-2664.
- [13] GILL E W, WALSH J. High-frequency bistatic cross sections of the ocean surface[J]. *Radio Science*, 2001, 36(6):1459-1475.
- [14] GILL E W, WALSH J. A combined clutter and noise model appropriate to the operation of high-frequency pulsed Doppler radar in regions constrained by external noise[J]. *Radio Science*, 2008, 43(4):1-15.
- [15] ZHANG J, GILL E W. Extraction of ocean wave information from simulated noisy high frequency bistatic radar data[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, 31(4):779-796.
- [16] WALSH J, ZHANG J, GILL E W. High frequency radar cross section of the ocean surface for an FMCW waveform[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2011, 36(4):615-626.
- [17] ZHANG J, WALSH J, GILL E W. Inherent limitations in high-frequency radar remote sensing based on Bragg scattering from the ocean surface[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2012, 37(3):395-406.
- [18] HASSELMANN K. On the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum, part 1, general theory[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1962, 12(14):481-500.
- [19] HASSELMANN K. Determination of ocean wave spectra from Doppler return from sea surface[J]. *Nature*, 1971, 229(1):16-17.
- [20] PIERSON W, MOSKOWITZ L. A proposed spectral form for fully developed seas based upon the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69(24):5181-5190.
- [21] TUCKER M J. *Waves in ocean engineering*[M]. New York: Ellis Horwood, 1991.

#### 作者简介：



张建军(1967-), 男, 石家庄市人, 博士, 教授, 主要研究方向为高频雷达海态信息获取与目标探测. email: 874690092@qq.com.