

# 高频地波雷达浪高参数提取的一种新算法

姚 敏, 文必洋, 黄 亮, 董志飞

(武汉大学电波传播实验室, 湖北武汉 430079)

摘 要: 从 Howell 深水无表面流情况下的二阶窄波束雷达截面方程出发, 提出了一种变换积分对象、不等积分区间构成稀疏矩阵方程来反演无向浪高谱的新算法. 在不同信噪比和不同海况条件下进行数值仿真, 当信噪比高于 35dB 时, 该算法有较高的反演精度. 并将该方法应用于“高频地波雷达现场对比验证试验”, 反演结果与观测船输出结果比较, 有效浪高的平均绝对误差为 0.32m, 并与 Barrick 法和 Howell 法进行了比较. 模拟结果和实测结果都表明该反演算法的正确性和可行性.

关键词: 高频地波雷达; 二阶截面方程; 无向浪高谱; 稀疏矩阵; 有效浪高

中图分类号: P715.7; TN958.93 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2006) 09-1729-05

## New Algorithm to Extract Ocean Wave Information from High Frequency Ground Wave Radar

YAO Min, WEN Bi-yang, HUANG Liang, DONG Zhì-fēi

(Radio Wave Propagation Laboratory, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China)

**Abstract** Based on the per unit area second-order cross section spectrum of the ocean proposed by Howell, a new algorithm to extract ocean wave information from HF radar backscatter by a narrow-beam antenna system is presented, in which the integral object is changed and the integral range is divided asymmetrically. Numerical simulation is performed under condition of different SNR and sea state. The simulation result shows that this algorithm has preferable precision under SNR higher than 35dB. As a further test of this algorithm, comparison are made between wave height estimates obtained from wave instrument and a HF ground wave radar at 7.7MHz using data collected during “The HF ground radar field contrast test”. The average absolute error of the significant wave height is 0.32m, which demonstrates the basic accuracy and feasibility of the inversion algorithm.

**Key words** high frequency ground wave radar; second-order cross section equation; non-direction wave height spectrum; sparse matrix; significant wave height

### 1 引言

高频地波雷达利用垂直极化电磁波沿海面绕射传播的原理实现对海洋状态参数的远程探测. 但目前, 比较成熟有效的是对海洋表面流进行探测, 海浪的探测还处于研究和发展阶段. 由高频雷达海洋回波探测海浪谱的困难在于如何高精度反演非线性二阶雷达截面方程. Barrick<sup>[1,2]</sup>、Lipa<sup>[3]</sup>、Howell<sup>[4]</sup>等人先后提出过反演浪高谱的方法, Barrick 法简便直接, 但误差较大; Lipa 法误差较小, 但只能测长浪信息, 适用范围较窄; Howell 法将海浪谱表示成傅立叶级数形式, 存在截断误差且得不到完整的浪高谱<sup>[5]</sup>. 本文以 Howell 的工作为基础, 提出了一种反演浪高的新方

法. 该算法避开 Howell 方法中傅立叶级数展开, 消除了截断误差, 并且变换积分方程中的积分对象, 使积分区间的划分更加合理, 理论意义更加明晰. 数值模拟结果表明在信噪比高于 35dB 的条件下, 该算法具有较高的精度.

### 2 海洋回波二阶散射截面

#### 2.1 基本方程的表示

Howell 将深水无表面流情况下的二阶窄波束雷达截面方程化为<sup>[4]</sup>

$$\sigma^{(2)}(\omega_d) = 2^8 p^2 k_0^4 \int_0^\pi |T_r|^2 J_r |S(k, \alpha) S(k', \alpha') + S(k, -\alpha) S(k', -\alpha')| k'^2 d\theta \quad (1)$$

式中,

$$\omega_d - m\omega - m'\omega' = 0, k' \geq k \quad (2)$$

$$k' = \sqrt{k^2 + 4kk_0 \cos\theta + 4k_0^2} \quad (3)$$

$$\theta' = \sin^{-1}(k \sin\theta / k') + \pi \quad (4)$$

$$m' = \text{sgn}(\omega_d) \quad (5)$$

$$m = \begin{cases} m', & |\omega_D| > \omega_B \\ -m', & 0 < |\omega_D| < \omega_B \end{cases} \quad (6)$$

$$J_i = (\sqrt{g} |1 + mm' \sqrt{k}(2k_0 \cos\theta + k) k'^{-3/2}|)^{-1} \quad (7)$$

$$T_H = -\frac{i}{2} \left[ k + k' - \frac{(kk' - k \cdot k')(\omega^2 + \omega_B^2)}{mm' \sqrt{kk'}(\omega^2 - \omega_B^2)} \right] \quad (8)$$

$$T_{EM} = \frac{1}{2} \left[ \frac{(k \cdot k_0)(k' \cdot k_0) / k_0^2 - 2k \cdot k'}{\sqrt{k \cdot k'} - k_0 \Delta} \right] \quad (9)$$

$$T = T_H + T_{EM} \quad (10)$$

$$\alpha = \theta + (1 - m)\pi/2 \quad (11)$$

$$\alpha' = \theta' + (1 - m')\pi/2 \quad (12)$$

上式中,  $T$  为耦合系数, 包含电磁耦合系数  $T_{EM}$  与流体力学耦合系数  $T_H$  两部分, 描述参与散射的二列海浪之间的耦合程度.  $m, m'$  分别取  $\pm 1$ , 对应参与散射的二列海浪相互组合的四种情况, 也对应于回波谱中的四个区域.  $k, k'$  是这二列海浪的波数,  $\theta, \theta'$  则对应这二列海浪波矢  $k, k'$  的方向,  $\alpha, \alpha'$  则表示散射波矢  $mk, m'k'$  的方向.  $S(k, \alpha)$  和  $S(k', \alpha')$  分别表示波矢为  $mk$  和波矢为  $m'k'$  的两列海浪的浪高谱.

## 2.2 归一化并线性化二阶散射截面方程

一阶峰的能量可以表示为<sup>[6]</sup>

$$R_m = \int_{\text{sgn}(\omega_d) = -m} \sigma_1(\omega_d) d\omega_d = 2^6 \pi^2 k_0^4 S(2k_0, (1 + m')\pi/2) \quad (13)$$

为了消除雷达系统增益和传播路径损耗的影响, 可以用二阶雷达散射截面除以相应一边的一阶峰能量<sup>[7]</sup>, 于是得到归一化的二阶雷达散射截面方程

$$\sigma_{2N}(\omega_d) = 4 \int_0^\pi \frac{|T_S|^2 J_i}{S(2k_0, (1 + m')\pi/2)} \cdot |S(k, \alpha) S(k', \alpha') + S(k, -\alpha) S(k', -\alpha')| k^{2/2} d\theta \quad (14)$$

Hasselmann<sup>[8]</sup>指出, 对于一阶峰附近的二阶多普勒谱区, 参与二阶散射的两列海浪一列为短浪, 其波矢  $k' \approx 2k_0$ , 这从约束方程式(2)可以得到. 且浪高谱随波数  $k'$  成  $k'^{-4}$  变化. 这种短波长的海浪在风力作用下总是处于饱和状态, 且有大致相同的方向. 利用这一事实有

$$S(k', \alpha') \approx S(k', -\alpha') \approx S(2k_0, (1 + m')\pi/2) \left(\frac{2k_0}{k'}\right)^4 \quad (15)$$

将式(15)代入式(14), 可得到线性化且归一化的二阶雷达散射截面方程

$$\sigma_{2N}(\omega_d) = 2^6 k_0^4 \int_0^\pi \frac{|T_S|^2 J_i}{k^4} |S(k, \alpha) + S(k, -\alpha)| k^{2/2} d\theta \quad (16)$$

此式在二阶谱区  $1.1\omega_B < |\omega_d| < 1.4\omega_B$  和  $0.6\omega_B < |\omega_d| < 0.9\omega_B$  都是合理并有效的<sup>[4]</sup>.

## 3 无向浪高谱反演

### 3.1 变换积分对象

在无线电海洋学中常用的有向海浪谱 PM 谱可写为关于波数的无向因子与关于角度的方向因子相乘的形式<sup>[9]</sup>:

$$S(k) = f(k) \cdot g(\theta + \varphi) \quad (17)$$

式中,  $g(\theta + \varphi)$  为方向因子, 其具体形式为

$$g(\theta + \varphi) = A \cos^2\left(\frac{\theta + \varphi - \varphi_w}{2}\right) \quad (18)$$

$\theta$  是雷达波束方向与海浪波列前进方向的夹角,  $\varphi$  表示雷达波束方向的方位角,  $\varphi_w$  表示海面风向的方位角,  $\theta + \varphi$  是海浪前进的方向,  $\theta + \varphi - \varphi_w$  是海面风向与海浪波列行进方向的夹角.  $S$  是扩展因子, 取值范围为  $[2, 16]$ , 典型值是  $4$ .  $A$  为常量, 取值  $4/(3\pi)$ <sup>[9]</sup>. 为方便计算, 将参考方向取为和雷达波束方向的方位角  $\varphi$  一致,  $S$  取为  $4$ , 则方向因子可表示为

$$g(\theta) = \frac{4}{3\pi} \cos^2\left(\frac{\theta - \varphi_w}{2}\right) \quad (19)$$

将式(17)、(19)代入海浪谱表达式  $S(k, \alpha)$  和  $S(k, -\alpha)$ , 则

$$S(k, \alpha) + S(k, -\alpha) = \frac{f(k)}{3\pi} \{2\cos(2\varphi_w) \cdot \cos^2\alpha + 4\cos\varphi_w \cdot \cos\alpha - \cos(2\varphi_w) + 3\} \quad (20)$$

其中,  $f(k)$  代表无向浪高谱, 是我们希望得到的. 风向  $\varphi_w$  可以从一阶谱提取<sup>[10, 11]</sup>. 为了使积分范围更加合理, 在该算法中将所有关于角度  $\theta$  的函数变换为关于波数  $k, k'$  的函数, 并把对角度  $\theta$  的积分变换为对波数  $k$  的积分. 由方程(3)可以得到

$$\cos\theta = \frac{k^2 - k'^2 - 4k_0^2}{4kk_0} \quad (21)$$

又由约束方程式(2)可以得到

$$k' = (\omega_d - m \cdot \sqrt{g \cdot k})^2 / g \quad (22)$$

由式(21)和(22), 在给定的  $\omega_d$  下, 因子  $J_i$  和耦合系数  $T_S$  都可以化为波数  $k$  的函数. 从而方程(16)可以化为

$$\sigma_{2N}(\omega_d) = 2^6 k_0^4 \int \frac{|\Gamma_S(\omega_d, k)|^2 J_i(\omega_d, k)}{K^4(\omega_d, k)} \cdot f(k) \cdot f(\omega_d, k) \cdot k^{2/2} \cdot \theta(\omega_d, k) dk \quad (23)$$

### 3.2 积分限的确定

由方程式(2)、(3)容易知道,  $m = m'$  情况下,  $\theta$  取  $0$  值时,  $k$  取最小值;  $\theta$  取  $\pi$  值时,  $k$  取最大值, 即<sup>[7]</sup>

$$k_{\min} = (\omega_d^2 - 2gk_0)^2 / (4g \cdot \omega_d^2) \quad (24)$$

$$k_{\max} = k_0 - \sqrt{k_0^2 - \frac{(\omega_d^2 - 2g \cdot k_0)^2}{4g^2}} \quad (25)$$

反之,  $m = -m'$  情况下,  $\theta$  取  $\pi$  值时,  $k$  取最小值;  $\theta$  取  $0$  值时,  $k$  取最大值. 可以看出, 对于每一个不同的  $\omega_d$  值,  $k$  的

取值范围是不一样的. 实际上, 随着  $\omega_d$  向正负一阶峰靠近的时候,  $k$  的取值范围越来越窄, 并且  $k$  的这一系列取值范围即相互错开又相互有重叠的部分.

### 3.3 不等积分区间, 构成稀疏矩阵方程

在方程式 (23) 中, 把积分区间不等分为  $J_{\omega_d}$  个足够小的区间, 可以认为在这些足够小的区间里,  $f(k_{j\omega_d})$  为一个常量. 并将余下的函数形式集中用  $C(\omega_d, k)$  来表示. 于是方程可化为

$$\sigma_N^2(\omega_d) = 2k_0^4 \cdot \sum_{j=1}^{J_{\omega_d}} f(k_{j\omega_d}) \cdot \int_{K_j \omega_d} C(\omega_d, k) \cdot dk \quad (26)$$

$K_j \omega_d$  是每一个小积分区间中  $k$  的取值范围, 它由式 (2)、(3) 确定. 对于相邻的  $\omega_d$  值,  $k$  的取值范围会出现重叠, 要保证方程之间是相关的, 小积分区间在重叠区域的划分就必须是一致的. 具体操作是: ① 给定  $M$  个  $\omega_d$  值, 分别求出这  $M$  个  $\omega_d$  值下  $k$  的取值范围  $K_M$ ; ② 将这  $M$  个取值范围  $K_M$  各等分为 10 段, 得到各分段点  $k_{\omega_d(1-10)}$ ; ③ 将所有的 ( $M \times 10$ ) 个分段点重新排序, 并去掉重复的分段点; ④ 各个  $K_M$  范围下所包含的分段点自动对每个  $K_M$  进行了分段. 分段总数为  $J_{\omega_d}$ , 相邻两个分段点就构成各个小积分区间的  $k$  的取值范围  $K_{j\omega_d}$ . 只要给定一系列的  $\omega_d$  值, 就可以将这一系列的代数方程化为一个矩阵方程. 由上述分析可以看出, 该矩阵方程的系数矩阵在  $k$  的取值范围重叠部分是非零元素, 而在错开部分则是零元素. 因此该矩阵方程将是一个带状稀疏矩阵方程

$$C \cdot X = S \quad (27)$$

上式中,  $C$  是矩形稀疏矩阵,  $S$  是归一化散射截面值,  $X$  是要求的无向浪高谱值矩阵, 解此稀疏矩阵方程则可以得到无向浪高谱.

### 3.4 有效浪高的计算

海洋学中, 有效浪高可根据下式计算<sup>[4]</sup>

$$H_s = 4h = 4 \sqrt{\int_0^{\infty} E(f) df} \quad (28)$$

而无向频率谱  $E(f)$  和无向波数谱  $F(k)$  的关系如下<sup>[4]</sup>

$$F(k) = TE(f) \quad (29)$$

$$T = \frac{\sqrt{g}}{4\pi k^{3/2}} \quad (30)$$

$$f = \frac{\sqrt{g} \cdot k}{2\pi} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } H_s &= 4 \sqrt{\sum_{j=1}^J \frac{F(k_j)}{T(k_j)} \cdot \frac{\sqrt{g}}{4\pi} \cdot k_j^{1/2} \Delta k} \\ &= 4 \sqrt{\sum_{j=1}^J F(k_j) \cdot k_j \cdot \Delta k} \end{aligned} \quad (32)$$

## 4 结果与分析

### 4.1 数值模拟和分析

图 1 给出了同一海况 (如表 1, 有效浪高为 2.3 m) 给定信噪比分别为 55 dB、45 dB、35 dB 下模拟的窄波束海面回波谱. 图 2 则给出了在相应的信噪比下采用本算法反演得到的无向浪高谱, 并与 Barrick 法和 Howell 法进行比较.

由图 2(a)、(b) 可以看到, 在信噪比较高的情况下, 本文算法的反演结果和 IM 真实谱吻合得相当好, 而 Barrick 法和 Howell 法则误差较大. 当信噪比降低到 35 dB (如图 2(c)) 时, 各算法反演得到的无向浪高谱与 IM 真实谱间的误差都增大, 但相对来讲, Barrick 法较好的保留了浪高谱的形状特征. 为了定性说明各种算法的有效性, 表 1 给出了图 2 谱图中各算法对应的峰值频率及有效浪高的

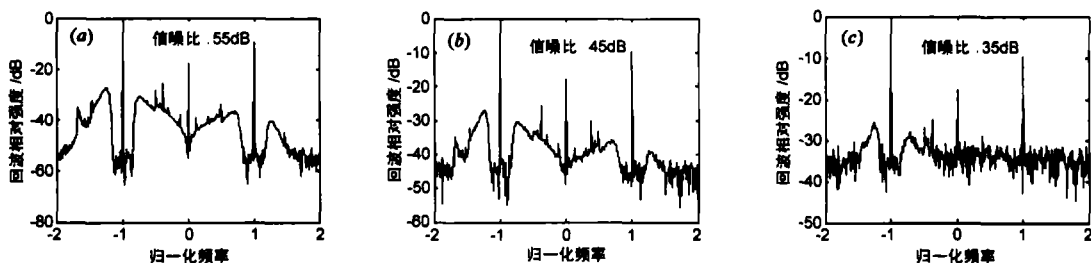


图 1 不同信噪比下的模拟多普勒谱图

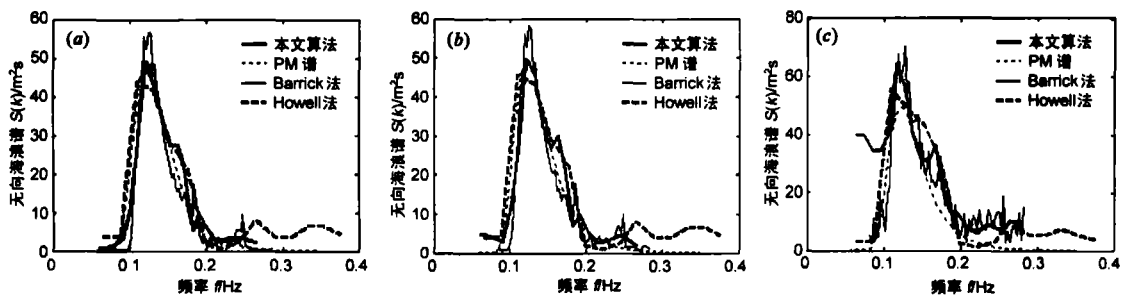


图 2 不同信噪比下各算法反演结果对比图

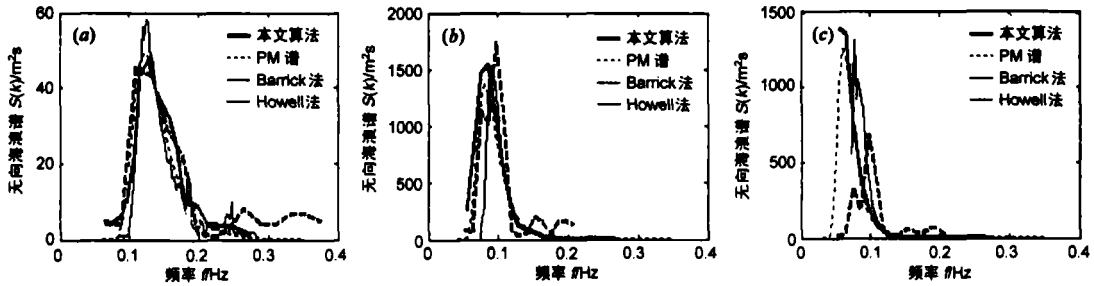


图3 等信噪比不同海况下各算法反演结果对比图

反演值与PM谱真实值的比较结果。

表1 反演值与真实值的比较结果

信噪比	55dB时		45dB时		35dB时	
	$H_s(m)$	$F_m(Hz)$	$H_s(m)$	$F_m(Hz)$	$H_s(m)$	$F_m(Hz)$
PM原始谱值	2.31	0.125	2.31	0.125	2.31	0.125
本文算法	2.37	0.122	2.44	0.122	2.94	0.117
Barrick法	2.17	0.125	2.33	0.125	3.35	0.128
Howell法	2.00	0.110	2.03	0.110	2.20	0.110

表2 反演值与真实值的比较结果

海况级别 (浪高/m)	2.31		5.38		9.44	
	$H_s(m)$	$F_m(Hz)$	$H_s(m)$	$F_m(Hz)$	$H_s(m)$	$F_m(Hz)$
PM原始谱值	2.31	0.125	5.38	0.080	9.44	0.060
本文算法	2.39	0.127	5.54	0.086	10.17	0.055
Barrick法	2.11	0.126	5.12	0.092	10.96	0.078
Howell法	2.00	0.110	3.53	0.097	6.86	0.097

为了进一步比较各算法的性能,图3给出了同一信噪比(40dB)下,海况分别为(a)浪高2.31m;(b)浪高5.38m;(c)浪高9.44m时各算法反演结果与PM真实谱的对比图。

由图3可知,在海况级别不高的情况下,各算法反演的浪高谱误差较小;在海况级别高的情况下,Barrick法和Howell法所反演的结果误差较大,效果不理想。结合图2所给出的三种情况,可以看到,在较高的信噪比(高于40dB)下,即使在海况级别高的情况时,本文算法反演的浪高谱与真实谱比较,误差较小,明显优于Barrick法和Howell法。当信噪比降低时,对本文算法和Howell法影响较大,而Barrick法较之稳定。因此,在海况级别或信噪比较高的情况下,采用本文算法可以得到较为准确的结果。当信噪比下降到35dB以下时,Barrick法则更加适用。表2则详细给出在海况分别为(a)浪高2.31m;(b)浪高5.38m;(c)浪高9.44m时各算法得到的峰值频率及有效浪高的反演值与PM谱真实值的比较结果。

由模拟的结果可以看到,在较高信噪比条件下,本文算法能得到较准确的反演结果,明显优于Barrick法和Howell法。当信噪比降低到35dB以下时,本文算法有一定的局限性。

#### 4.2 实测结果

图4给出了采用本文算法、Barrick法、Howell法对2000年10月28日同一海域的浪高反演结果与观测船探测结果的对比。观测船所在位置(122°41'E, 29°39'N),距朱家尖雷达站约40km。雷达工作频率为7.5MHz。本文算法能反演出的海浪频率范围为0.032~0.270Hz,而Howell算法为0.044~0.133Hz。相比之下,本文所确定的海洋回波谱的频率范围能更好确定RMS浪高估计。试验结果表明,若以船上现场测量的数据为准,本文算法反演浪高的平均绝对误差为0.32m, Barrick法和Howell法的误差则分别为0.51m和0.87m。表明本文所描述的反演方法在此对比验证试验期间的海况条件下是有效的。

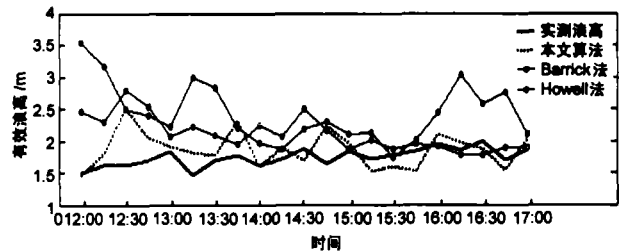


图4 各算法反演结果对比图

#### 5 结论

本文反演浪高方法同Howell法相比,避开对海浪谱作傅立叶展开,从理论上消除了模型带来的截断误差;且变换积分对象,对积分区间不均匀分段,使分段后的积分范围确定更加合理,理论意义更加清晰。从模拟结果和实测结果均可看到,该算法相对Barrick法和Howell法,误差明显减小,证明了该方法的可行性。如果采用双站雷达系统,可以在保证反演精度的前提下,适当舍弃海量能量密度较小的频率,提高算法运算效率,使算法更具有实用性。

#### 参考文献:

[1] Barrick D E. The ocean wave-height non-directional spectrum from inversion of the HF sea-echo Doppler spectrum [J]. Remote Sens Environ, 1977, 6: 201-227.  
 [2] Barrick D E. Extraction of wave parameters from measured HF radar sea-echo Doppler spectra [J]. Radio Science

- 1977, 12(3): 415- 424
- [3] Belinda Lipa Derivation of directional ocean wave spectra by integral inversion of second-order radar echoes[ J]. Radio Science, 1977, 12(3): 425- 434
- [4] Randy Howell John Walsh Measurement of ocean wave spectra using narrow-beam HF radar[ J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1993, 18(3): 296- 305
- [5] John N A tanga Lucy R Wyatt Comparison of inversion algorithms for HF radar wave measurements[ J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1997, 22(4): 593- 603
- [6] Belinda J Lipa Donald E Barrick Extraction of sea state from HF radar sea echo mathematical theory and modeling[ J]. Radio Science, 1986, 21(1): 81- 100
- [7] Belinda J Lipa Donald E Barrick Analysis methods for narrow-beam high-frequency radar sea echo[R]. U. S. National Oceanic and Atmospheric Administration Boulder CO, 1982
- [8] Hasse mann K. Determination of ocean wave spectra from Doppler radio return from the sea surface[ J]. Nature Physics Science, 1971, 229: 16- 17
- [9] Moskowitz M. Estimates of the power spectrum of fully developed seas for wind speeds of 20 to 40 knots[ J]. J Geophys Res, 1964, 69: 5161- 5179

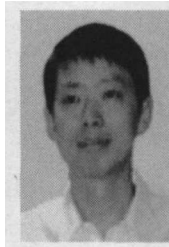
- [10] 吴世才, 刘海文, 文必洋. 一种海洋表面矢量流图生成算法的研究[ J]. 电波科学学报, 1999, 14(1): 61- 65
- [11] 黄为民, 文必洋, 吴世才. 消除风向模糊性的一种方法[ J]. 武汉大学学报(理学版), 2001, 47(5): 645- 648

#### 作者简介:



姚 敏 女, 1981年 11月出生于湖北省武汉市. 2003年毕业于武汉大学电子信息学院电子工程系. 现为武汉大学电信学院硕士研究生. 从事高频地波雷达信号处理研究.

E-mail yaomin114@ china. cn



文必洋 男, 1963年出生于湖北省仙桃市. 武汉大学电信学院博士生导师, 教授. 现从事高频地波雷达系统及海洋遥感研究.

E-mail bywen@ whu. edu. cn