

高频地波雷达多站浅海水深与海流反演*

李伦^{1)2)†} 吴雄斌²⁾

1) (武汉数字工程研究所, 武汉 430074)

2) (武汉大学电子信息学院, 武汉 430072)

(2013年12月28日收到; 2014年2月20日收到修改稿)

针对高频地波雷达浅海观测尝试中面临的参数反演新问题进行了研究. 描述了高频地波雷达浅海探测机理, 提出了多站高频地波雷达海洋参数反演方法, 并推导了利用多站高频地波雷达回波多普勒谱反演浅海水深和矢量流的理论模型. 通过三站探测和多站探测的反演数值模拟, 表明了多站浅海探测的可行性和反演方法的有效性; 通过分析苏北浅滩的三站高频地波雷达观测试验数据, 表明了本文反演方法的实用性, 这对于利用高频地波雷达进行浅海海洋环境探测的实际工程应用具有广阔的前景.

关键词: 高频地波雷达, 矢量流, 浅海水深, 反演

PACS: 84.40.xb, 93.85-q, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.63.118404

1 引言

近几十年来随着电磁波理论和技术应用的发展, 无线电海洋探测已经形成了多波段、多平台的观测方式, 主要波段包括红外遥感、高光谱遥感、高频/超高频探测、微波遥感等, 平台涉及星载遥感、岸基遥感和舰载遥感等, 这些多平台多波段的联合组网观测, 相互配合、优势互补, 形成了对海洋环境的立体化精细观测^[1-4]. 高频无线电海洋探测是从1955年Crombie利用在高频电波进行海面回波观测与分析发现雷达回波类似于晶体Bragg散射机理基础上发展起来的一种海洋探测方式^[5]. Barrick最早利用微扰法建立了比较完善的高频电磁波海面一阶和二阶散射理论模型, 解释了雷达回波谱中的一阶谱峰和周围的二阶谱峰, 表明能在一阶谱和二阶谱中提取海流、海风和海浪等海洋动力学参数信息^[6-10], 并开发了相应的海洋探测雷达系统, 随后高频地波雷达蓬勃发展. 高频地波雷达的发展先后经历了单基地单频率探测、单基地多频率探测、单/双基地组网探测等模式, 目前正处于

天/地波混合探测和外辐射源无源探测阶段. 高频地波雷达利用垂直极化的高频电波具有沿海面传播衰减小、能绕射的特点, 能实现对海面的超视距探测. 相比传统探测仪器的点、线式探测数据, 高频地波雷达可以提供覆盖面积大、实时性强的探测数据, 而且不受台风、海啸等恶劣天气的限制. 经过近40年的发展, 高频地波雷达表面流场的探测已经达到业务化运行阶段, 而风场和浪场的反演技术处于发展阶段^[11-13].

目前, 实际业务化运行的高频地波雷达都是在深水条件下进行海洋动力学参数反演, 由于深水条件下海浪相速度(海浪传播的速度)引起的多普勒频移与水深无关, 而事实上海洋中存在浅水区, 尤其是更加引起人们关心的近岸水深较浅, 使得海洋重力波相速度不确定, 这会对从雷达回波中提取海洋表面动力学参数造成影响^[12,14]. 目前已有的高频地波雷达浅海探测方法均是通过实测的浅海水深数据对海洋参数反演进行补偿, 这就需要获取大面积实时浅海水深数据以及及时对反演参数进行修正, 实现起来比较困难. 文献^[15]验证了利用高频地波雷达探测海洋重力波相速度的可行性, 并用深

* 国家自然科学基金(批准号: 60571065)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2009AA09A301, 2012AA091701)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lilunhp@163.com

水条件下的实测数据进行了分析, 可以推广到浅水探测情况. 作为文献 [15] 工作的推广在浅水条件下进行高频地波雷达观测, 本文提出了利用高频地波雷达多站进行浅海水深和矢量流联合探测的方法, 在测量矢量流的同时, 能反演出浅海水深, 无需额外的浅海水深辅助数据, 能大大节约成本, 还能获取新的探测参数, 提高高频地波雷达浅海探测能力.

2 反演数学模型

2.1 反演机理

在 Crombie 于 1955 年开创性的高频地波雷达海洋回波实验观测基础上, Barrick 于 1972 年基于微扰法推导了高频无线电波与海洋表面相互作用的一阶和二阶散射系数, 并提出了从一阶海洋回波中反演海流的方法, 该散射系数可以表示为 [6]

$$\sigma^{(1)}(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \times \sum_{m=\pm 1} S(-2m\mathbf{k}_0) \delta(\omega - m\omega_B), \quad (1)$$

其中, $\sigma^{(1)}$ 表示电波与海面波浪相互作用的一阶散射系数, ω 表示多普勒角频率, \mathbf{k}_0 是雷达电波波矢量, ω_B 为 Bragg 散射频率, g 为重力加速度. (1) 式中的 δ 函数表明海面一阶散射对应于回波谱中左右两个谱峰, $m = \pm 1$ 分别表示海浪传播方向指向和背离雷达波束方向, $S(-2m\mathbf{k}_0)$ 表示产生一阶作用的两列海浪分别对应与朝向和背离雷达波束方向的两列海浪, 且波长为雷达电波波长的一半. 式中 ω_B 是由于海浪相速度引起的多普勒频率偏移, 在存在海流的情况下, 海流的径向分量也会产生附加的多普勒频移, 因此一阶作用产生的多普勒频移可以表示为

$$f_{V_r} + m f_B = f_{r,m}, \quad (2)$$

其中, $f_{r,-1}$ 和 $f_{r,1}$ 分别为负一阶谱和正一阶谱多普勒频移, f_B 和 f_{V_r} 分别为海浪相速度引起的多普勒频移和海流径向分量引起的多普勒频移, 分别可以表示为

$$f_B = \frac{\omega_B}{2\pi} = \frac{2V_P}{\lambda_0}, \quad f_{V_r} = \frac{2V_r}{\lambda_0}. \quad (3)$$

根据重力波色散关系 $\omega^2 = gk \tanh(kh)$, 可以知道

$$V_P = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)}, \quad (4)$$

其中, k 为海洋重力波波数, 则可以知道当波数一定时, 重力波相速度是水深的函数, 且具有单调性, 从而可以知道对于高频地波雷达浅海探测, 回波一阶谱多普勒频移是径向流速和水深共同决定的, 从而为联合反演水深和海流提供了理论基础.

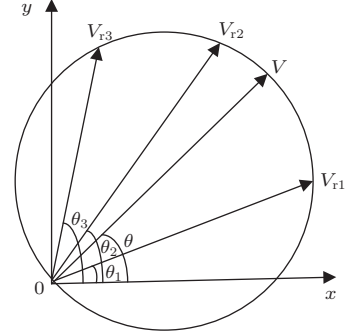


图1 三站雷达探测海流方位图

2.2 反演模型

从 2.1 中的论述可以知道回波一阶谱多普勒频移是径向流速和水深共同决定的, 而至少两个方向的径向流才能确定矢量流, 因此至少需要三部雷达对同一区域的照射才能同时得到海流和水深信息. 图 1 给出了三部雷达照射的方位图, 其中 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别为三部雷达相对参考方向的照射方位, V_{r1}, V_{r2}, V_{r3} 分别为三部雷达测量的径向流信息, V 和 θ 为矢量流大小和方位, 则可以得到

$$\begin{aligned} V_{r1} &= V \cos(\theta - \theta_1) = V \cos \theta \cos \theta_1 \\ &\quad + V \sin \theta \sin \theta_1, \\ V_{r2} &= V \cos(\theta - \theta_2) = V \cos \theta \cos \theta_2 \\ &\quad + V \sin \theta \sin \theta_2, \\ V_{r3} &= V \cos(\theta - \theta_3) = V \cos \theta \cos \theta_3 \\ &\quad + V \sin \theta \sin \theta_3. \end{aligned} \quad (5)$$

令 $x = V \cos \theta, y = V \sin \theta$, 则 (5) 式可以简化为

$$\begin{aligned} V_{r1} &= x \cos \theta_1 + y \sin \theta_1, \\ V_{r2} &= x \cos \theta_2 + y \sin \theta_2, \\ V_{r3} &= x \cos \theta_3 + y \sin \theta_3. \end{aligned} \quad (6)$$

根据 (2) 式, 三部雷达回波的多普勒频移可以联立为

$$\begin{aligned} f_{V_{r1}} + m f_B &= f_{r1,m}, \\ f_{V_{r2}} + m f_B &= f_{r2,m}, \\ f_{V_{r3}} + m f_B &= f_{r3,m}. \end{aligned} \quad (7)$$

从而可以得到

$$\begin{aligned} \frac{2V_{r1}}{\lambda_0} + mf_B &= f_{r1,m}, \\ \frac{2V_{r2}}{\lambda_0} + mf_B &= f_{r2,m}, \\ \frac{2V_{r3}}{\lambda_0} + mf_B &= f_{r3,m}. \end{aligned} \quad (8)$$

将(6)式代入(8)式有

$$\begin{aligned} 2 \cos \theta_1 x + 2 \sin \theta_1 y + mf_B \lambda_0 &= f_{r1,m} \lambda_0, \\ 2 \cos \theta_2 x + 2 \sin \theta_2 y + mf_B \lambda_0 &= f_{r2,m} \lambda_0, \\ 2 \cos \theta_3 x + 2 \sin \theta_3 y + mf_B \lambda_0 &= f_{r3,m} \lambda_0. \end{aligned} \quad (9)$$

将(9)式写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} 2 \cos \theta_1 & 2 \sin \theta_1 & m\lambda_0 \\ 2 \cos \theta_2 & 2 \sin \theta_2 & m\lambda_0 \\ 2 \cos \theta_3 & 2 \sin \theta_3 & m\lambda_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ f_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{r1,m} \lambda_0 \\ f_{r2,m} \lambda_0 \\ f_{r3,m} \lambda_0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

(10)式建立了矢量流速与海浪相速度引起的多普勒频移的反演模型, 根据此模型得到 f_B 后即可进行Bragg海浪相速度和进行浅海水深反演, 从而建立了多站浅海探测的矢量流、海浪相速度与水深反演的理论模型, 对于站点多于三个的情况, 可以描述为

$$\begin{bmatrix} 2 \cos \theta_1 & 2 \sin \theta_1 & m\lambda_0 \\ 2 \cos \theta_2 & 2 \sin \theta_2 & m\lambda_0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 2 \cos \theta_n & 2 \sin \theta_n & m\lambda_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ f_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{r1,m} \lambda_0 \\ f_{r2,m} \lambda_0 \\ f_{r3,m} \lambda_0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

令

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2 \cos \theta_1 & 2 \sin \theta_1 & m\lambda_0 \\ 2 \cos \theta_2 & 2 \sin \theta_2 & m\lambda_0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 2 \cos \theta_n & 2 \sin \theta_n & m\lambda_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} f_{r1,m} \lambda_0 \\ f_{r2,m} \lambda_0 \\ f_{r3,m} \lambda_0 \end{bmatrix},$$

则利用最小二乘法可以得到

$$\begin{bmatrix} x & y & f_B \end{bmatrix}^T = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B}. \quad (12)$$

从而可以得到流速、流向和相速度

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= \left(\sqrt{x^2 + y^2}, \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \right), \\ V_P &= \frac{f_B \lambda_0}{2}. \end{aligned} \quad (13)$$

对于浅海水深, 可以将得到的海浪相速度联立(4)式来得到.

3 数值模拟

为了验证上述反演模型的有效性, 设计了数值模拟试验进行仿真反演, 在三个站点探测情况下, 设计了两个反演试验, 探测频率分别为8 MHz和15 MHz, 分别给定了水深和矢量流数据, 先进行正演, 然后加入高斯白噪声进行反演; 在多站条件下, 分别从3站到10个站点探测进行了反演, 并设置了一个异常海流来检验模型的稳定性.

3.1 三站探测数值模拟

1) 高频地波雷达的工作频率为8 MHz, 矢量流速为100 cm/s, 矢量流方向为30°, 设三部雷达波束照射方位分别为-10°, 50°, 80°, 设水深为3 m, 则与电波谐振的一阶海浪波长为18.75 m, 相应海浪相速度为5.2215 m/s, 依据(4)式可以知道海浪引起的多普勒频移为0.2785 Hz, 理论上三部雷达探测的径向流分别为76 cm/s, 93 cm/s, 64 cm/s, 数值模拟过程中加入方差为5 cm/s的零均值高斯白噪声, 做10000次Monte Carlo随机试验, 进行矢量流和水深反演, 图2给出了反演结果, 其中图2(a)为反演的矢量流流速大小统计图, 图2(b)为反演的矢量流流向大小统计图, 图2(c)为反演的海浪相速度大小统计图, 图2(d)为反演的浅海水深大小统计图, 反演误差标准差为0.0280 m/s, 0.3319°, 0.0519 m/s和0.0224 m.

2) 高频地波雷达的工作频率为15 MHz, 矢量流速为80 cm/s, 矢量流方向为60°, 设三部雷达波束照射方位分别为-10°, 50°, 80°, 设水深为3 m, 则与电波谐振的一阶海浪波长为10 m, 相应海浪相速度为3.8593 m/s, 依据(4)式可以知道海浪引起的多普勒频移为0.2785 Hz, 理论上三部雷达探测的径向流分别为76 cm/s, 93 cm/s, 64 cm/s, 数值模拟过程中加入方差为5 cm/s的零均值高斯白噪声, 做10000次Monte Carlo随机试验, 进行矢量流和水深反演, 图3给出了反演结果, 其中图3(a)为反演的矢量流流速大小统计图, 图3(b)为反演的矢量流流向大小统计图, 图3(c)为反演的海浪相速度大小统计图, 图3(d)为反演的浅海水深大小统计图, 反演误差标准差为0.0250 m/s, 0.9987°, 0.2142 m/s和0.0224 m.

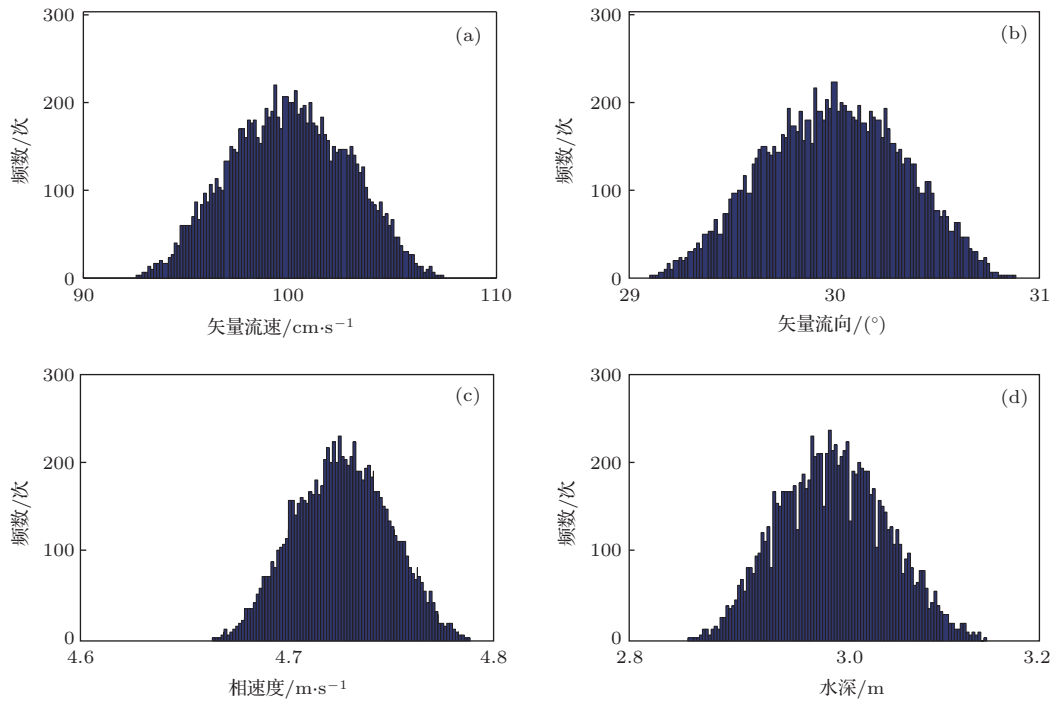


图2 三站矢量流与水深反演数值模拟1(电波频率 8 MHz, 水深 3 m)

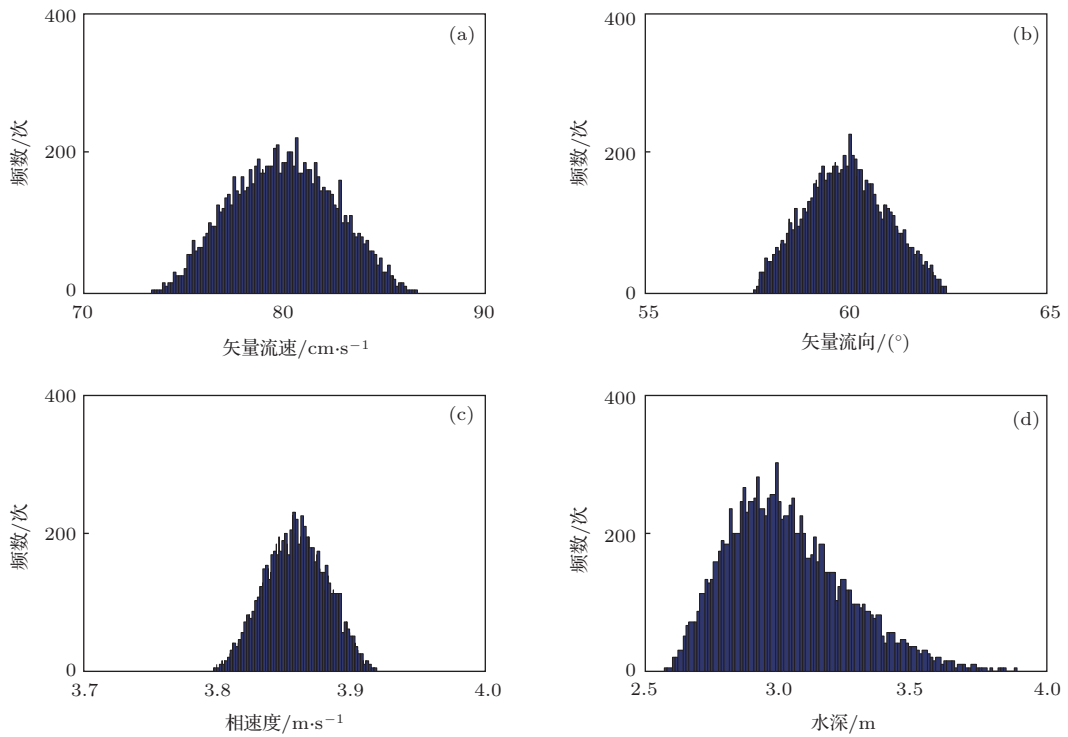


图3 三站矢量流与水深反演数值模拟2(电波频率 15 MHz, 水深 3 m)

3.2 多站探测数值模拟

高频地波雷达的工作频率为 8 MHz, 矢量流速为 100 cm/s, 矢量流方向为 30°, 设十个雷达波束照射方位分别为 10°, 50°, 80°, -30°, -10°, -80°,

-70°, -50°, 20°, 0°, 设水深为 3 m, 海流中加入的随机噪声方差为 5 cm/s, 表 1 中给出了从 3 站到 10 站利用上述最小二乘法反演的模拟仿真结果, 可以看出, 随着照射波束的增加, 误差越小; 从信息论的角度来说, 观测数据越多, 测量误差越小, 抗干扰性

越强. 将第一个波束的噪声方差加大到 35 cm/s, 可以视为一个异常海流, 然后进行反演, 表 2 给出了 4 波束至 10 波束的反演结果, 可以看出随着照射

波束的增加, 误差越小, 抗虚假海流干扰的能力越强. 从反演结果的标准差变化曲线上能明显的看到这一点.

表 1 8 MHz, 3 m, 方差 5 cm/s

	流速大小 /cm·s ⁻¹	雷达波束 方向/(°)	噪声方差 /cm·s ⁻¹	反演流速 误差方差	反演流向 误差方差	反演相速度 误差方差	反演水深 误差方差
1	93.97	10	5	—	—	—	—
2	93.97	50	5	—	—	—	—
3	64.28	80	5	0.1935	3.8078	0.1774	0.4424
4	50	-30	5	0.0789	1.3969	0.0616	0.1437
5	76.60	-10	5	0.0777	1.2535	0.0612	0.1432
6	-34.20	-80	5	0.0318	1.2401	0.0247	0.0579
7	-17.36	-70	5	0.0286	1.2430	0.0222	0.0521
8	17.36	-50	5	0.0287	1.2024	0.0222	0.0519
9	64.28	20	5	0.0270	1.1341	0.0216	0.0506
10	86.80	0	5	0.0255	1.1190	0.0215	0.0504

表 2 8 MHz, 3 m, 方差 5 cm/s, 存在一异常海流, 误差方差为 35 cm/s

	流速大小 /cm·s ⁻¹	雷达波束 方向/(°)	噪声方差 /cm·s ⁻¹	反演流速 误差方差	反演流向 误差方差	反演相速度 误差方差	反演水深 误差方差
1	93.97	10	35	—	—	—	—
2	93.97	50	5	—	—	—	—
3	64.28	80	5	—	—	—	—
4	50	-30	5	0.3219	5.3303	0.1988	0.4954
5	76.60	-10	5	0.2972	3.2842	0.1911	0.4808
6	-34.20	-80	5	0.0965	2.5493	0.0387	0.0893
7	-17.36	-70	5	0.0938	2.5777	0.0354	0.0828
8	17.36	-50	5	0.0934	2.3347	0.0367	0.0846
9	64.28	20	5	0.0783	1.7521	0.0317	0.0725
10	86.80	0	5	0.0636	1.4551	0.0275	0.0637

4 实测数据分析

4.1 实测数据反演流程

对于宽波束高频地波雷达, 通常采用一发多收的天线形式, 发射天线具有较宽的天线方向波束, 一般在 120° 以上, 通过多根接收天线组成阵列来进行方向分辨, 因此接收到的回波具有较宽的多普勒一阶谱去. 对于较宽的一阶谱区, 为发射波束范围内所有海洋回波共同作用的结果, 显然不能直接应

用 (11) 式进行相速度和流速反演, 必须寻找来自同一方位的正负多普勒频移对, 这里需要采用超分辨率算法对每部雷达正、负一阶谱区内每个谱点进行方向估计, 然后找出多部雷达照射的同一个海元内的多普勒频率偏移, 图 4 给出了宽波束雷达相速度反演的基本流程框图. 针对宽波束高频地波雷达, 本文利用 MUSIC (Multiple Signal Characteristic) 超分辨率算法进行一阶谱点方向估计, 该算法具有分辨率高, 计算量小, 运算速度快等特点 [16].

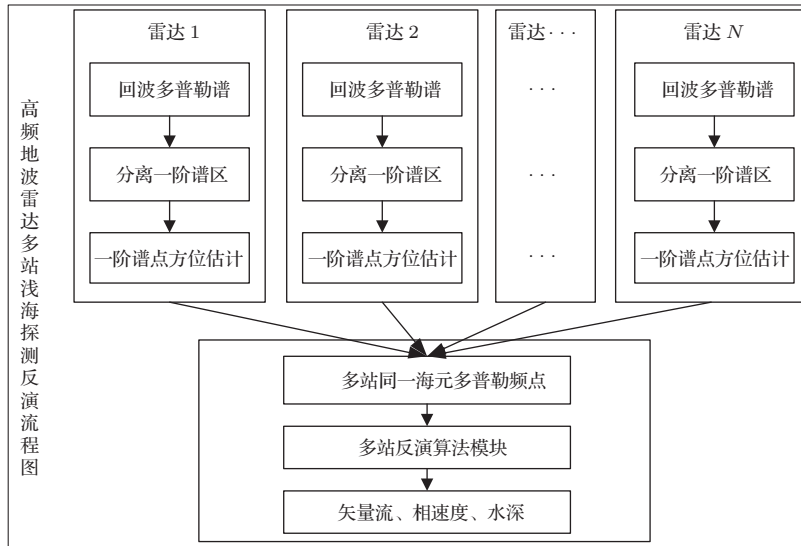


图4 宽波束高频地波雷达重力波相速度反演流程

4.2 雷达实测数据

2011年7月至8月初, 武汉大学、南京大学和厦门大学在江苏南通和盐城所在海域进行了高频地波雷达苏北浅滩观测试验, 试图对浅海海域海洋动力学参数进行探测. 观测试验期间设有大丰港、北凌闸和太阳岛三个临时观测点, 每个观测点布设一部高频地波雷达, 三部雷达分别独立工作, 试验站点分布如图5所示, 其中大丰港距北凌闸66.6 km, 北凌闸距太阳岛41.7 km, 大丰港距太阳岛92.4 km.



图5 苏北浅滩高频地波雷达观测试验站点分布图

高频地波雷达 OSMAR081 是我国研制的阵列式 OSMAR 系列高频地波雷达的全新数字化雷达, 回波信号质量较 OSMAR 工程样机有较大的改善. 该系统包括雷达发射机、接收机、天馈系统、显示与存储系统几个部分. 该雷达是采用 FMICW 波形的

宽波束地波雷达, 波束范围可达 150° , 扫频带宽为 30 kHz 至 300 kHz 可变, 距离分辨率为 5 km 至 500 m, 接收阵列为 8 至 16 元非线性阵列, 采用基于海洋回波的无源校准方法进行通道幅度和相位一致性校准后, 利用超分辨算法进行 MUSIC (Multiple Signal Characteristic) 空间谱估计对海流测向精度可达 1.5° , 该雷达每 0.6528×1024 s 可以得到一场多普勒谱数据. 图7给出了 8 MHz 电波频率探测的距离-多普勒谱, 北凌闸站 7 月 3 日 12:10 第 6 号天线接收, 从图上可以明显看到三维多普勒谱特征: 在正、负 Bragg 频率附近有两个较强的一阶谱区, 距离可达 150 km, 在 110 km 至 140 km 附近有覆盖整个多普勒频率的强回波, 这是由于天线辐射部分能量到电离层, 电离层回波引起的, 通常称为电离层干扰. 图中的两条竖线是深水条件下的 Bragg 频率线.

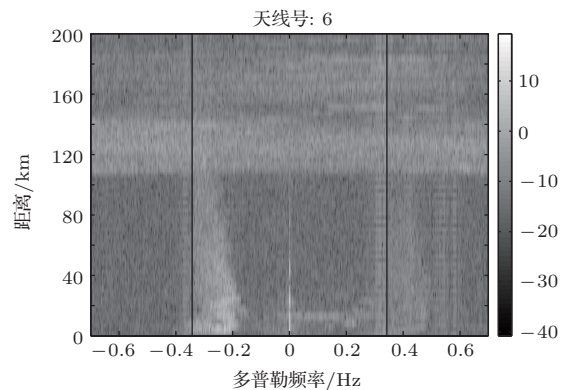


图6 OSMAR081 回波多普勒谱

4.3 实测数据反演结果与分析

分析的数据时间为2011年7月25日, 此时三个雷达站的工作频率为11.159 MHz, 扫频带宽为120 kHz, 距离分辨率为1.25 km. 选取的雷达元为北陵闸和太阳岛站的阵列法线交点处, 距太阳岛站22 km, 距北陵闸站40 km, 距大丰港74 km, 距离元分别为18, 32, 60. 图7给出了按照本文提出的方法反演的结果, 其中图7(a)和(b)分别对应反演的矢量流流速和流向, 从图上可以看出在24 h内该海域的矢量流呈半日潮变化特征. 图7(c)和(d)分

别为反演的海洋重力波相速度和浅海水深, 由于雷达电波波长为26.88 m, 与之产生谐振的海浪波长为13.44 m, 在深水条件下, 海浪的相速度为4.5788 m/s, 在浅水条件下, 海浪相速度应低于这一值, 从本文的反演结果来看, 是满足这一条件的, 反演的水深在2.79 m至6.19 m, 从图上可以明显看出水位的半日周期变化特性, 与这一海域的水位变化特征是相符合的, 表明了本文反演方法的有效性. 具体探测精度的分析需要船测数据的同步观测, 这有赖于后续试验的进行.

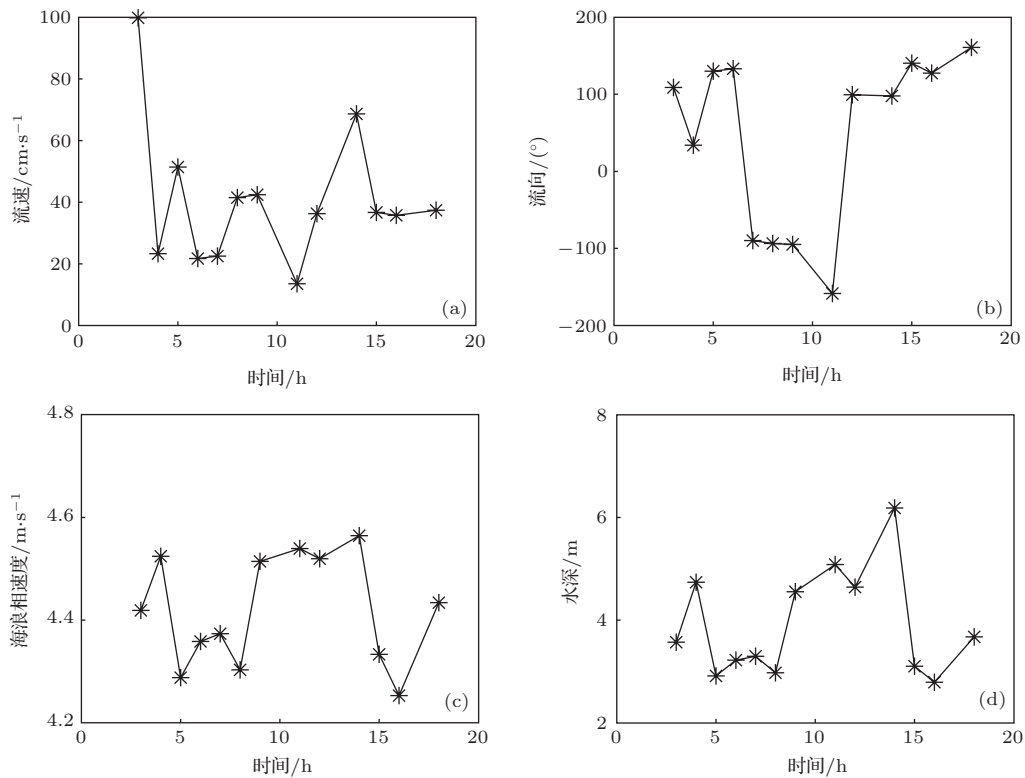


图7 反演结果 (a) 矢量流流速大小; (b) 矢量流流向; (c) 海浪相速度; (d) 浅海水深

5 结 论

高频地波雷达浅海观测是高频地波雷达海洋探测新的尝试, 由于海洋重力波的浅水效应造成其海洋动力学参数反演具有一些新的特点, 同时也增大了反演难度. 文中基于高频地波雷达浅海探测机理, 提出了多站高频地波雷达浅海水深与矢量流联合反演方法, 通过设计Monte Carlo仿真试验和苏北浅滩三部地波雷达探测的实测数据进行矢量流、重力波相速度和水深反演, 验证了本文提出方法的可行性和有效性. 本文提出的方法在实际应用中有着广阔的前景, 探测精度的分析和检验有待于船测

同步观测数据的获取, 这是下一步要重点进行的内容.

参考文献

- [1] Huang S X, Zhao X F, Sheng Z 2009 *Chin. Phys. B* **18** 115084
- [2] Zhang Y M, Wang Y H, Zhan Z F 2010 *Chin. Phys. B* **19** 084103
- [3] Zhang J P, Wu Z S, Wang B 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 034301
- [4] Sheng Z, Fang H X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 029301
- [5] Crombie D D 1953 *Nature* **175** 681
- [6] Barrick D E 1972 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **20** 2

- [7] Mao Y, Guo L X, Din H F, Liu W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 0442 (in Chinese) [毛媛, 郭立新, 丁惠芬, 刘伟 2012 物理学报 **61** 0442]
- [8] Wu X B, Li L, Li Y 2012 *Ocean. Et Lim. Sinica.* **43** 210 (in Chinese) [吴雄斌, 李伦, 李炎 2012 海洋与湖沼 **43** 210]
- [9] Li L, Wu X B, Liu B, Long C 2013 *Chinese J. Geophysics* **56** 219 (in Chinese) [李伦, 吴雄斌, 刘斌, 龙超 2013 地球物理学报 **56** 219]
- [10] Li L, Wu X B, Xu X A 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 030442 (in Chinese) [李伦, 吴雄斌, 徐兴安 2014 物理学报 **63** 030442]
- [11] Wu X B, Yang S L, Cheng F 2003 *Chinese J. Geophysics.* **46** 03340 (in Chinese) [吴雄斌, 杨绍麟, 程丰 2003 地球物理学报 **46** 03340]
- [12] Lipa B J, Barrick D E 1986 *Radio Sci.* **21** 81
- [13] Barrick D E, Lipa B J 1986 *IEEE J. Oceanic Eng.* **11** 310
- [14] Lipa B J, Barrick D E 2008 *Sensor.* **8** 4611
- [15] Li L, Wu X B, Xu X A, Liu B, Long C 2012 *IEICE Electron. Express.* **9** 07724
- [16] Schmidt R 1986 *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* **24** 03276

Multiple sites HFSWR ocean shallow water depth and current inversion*

Li Lun^{1)2)†} Wu Xiong-Bin²⁾

1) (Wuhan Digital Engineering Institute, Wuhan 430074, China)

2) (Electronic Information Institute of Wuhan University, Wuhan 430072, China)

(Received 28 December 2013; revised manuscript received 20 February 2014)

Abstract

In order to extract the ocean dynamic parameters from shallow water, water depth, and current inversion at multiple (three or more) sites, HFSWR (high frequency surface wave radar) sea echo is developed. In this paper the inversion principle and theoretical model are presented in detail, and the proposed idea is verified for three or more than three sites, which shows prospects in practice. By analyzing the data collected from three HFSWR detection experiments in northern Jiangsu province, the inversion results show good performance, which is promising for extracting ocean water depth in inner zone and shallow water by HFSWR in engineering application.

Keywords: HFSWR, vector current, shallow water depth, inversion

PACS: 84.40.xb, 93.85-q, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.63.118404

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60571065), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2009AA09A301, 2012AA091701).

† Corresponding author. E-mail: lilunhp@163.com