

苏北浅滩波浪传播速度的高频地波雷达探测

钟耀照^①, 李炎^{①*}, 吴雄斌^②, 高抒^③, 周涛^④, 汪亚平^③, 高建华^③

① 福建省海陆界面生态环境重点实验室, 厦门大学环境科学研究中心, 厦门 361005;

② 武汉大学电子信息学院空间物理系, 武汉 430072;

③ 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093;

④ 中国船舶重工集团公司第七二四研究所, 南京 210003

* 联系人, E-mail: liyan@xmu.edu.cn

2013-05-07 收稿, 2013-09-10 接受, 2013-11-22 网络版发表

海洋公益性行业科研专项经费(201005012, 201005006)、国家自然科学基金(40876031)、国家高技术研究发展计划(2012AA091701)和江苏省科技计划项目基础研究计划(SBK201150144)资助

摘要 应用雷达波 Doppler 正频移与负频移信号联解波速和径向流速方法, 在 2011 年 7 月苏北浅滩高频地波雷达观测试验中实现潮间浅滩海面波浪传播速度的观测. 基于频移与波速两级数据质量控制后统计的苏北浅滩平均波速平面分布图, 可分辨出与潮间浅滩、水下岸坡和潮汐水道等浅滩地貌单元相关的波速分区格局. 同步检验表明: 雷达观测波速与现场观测水深的关系统计意义上遵循微幅波理论, 径向流速较大条件下的波速观测质量较好, 复杂地形所致双向波速不等现象导致波速观测质量降低, 高频地波雷达是潮间浅滩动态遥感监测的潜在工具.

关键词

海洋遥感
高频地波雷达
波浪传播速度
水深
潮间浅滩

Airy 于 1845 年奠定的近岸波浪微幅波理论, 已经成为很多教科书中都要详细论述的经典. 它的一些重要结论, 包括波浪传播速度(以下简称波速)、波长和水深之间所满足的频散关系、波压对波形的响应关系、水质点运动轨迹的特征、能量的传播规律等, 被广泛地应用于解释自然界中的波浪现象和解决海岸和近海工程中的技术问题^[1]. 自 1955 年 Crombie^[2] 观测到无线电波海面波浪布拉格(Bragg)散射信号的 Doppler 谱后, 以 Barrick 为代表的一批无线电海洋学研究者于 20 世纪 70 年代提出了后来在海面流场监测中得到了广泛运用的高频地波雷达遥感观测技术^[3-12], 其经典方法一直沿用微幅波理论导出的深水波频散关系, 即认为雷达波海面 Bragg 散射对应波长的波浪, 是具有波速各向同性的深水波, 其波速仅与波的周期有关, 与水深无关, 故据 Bragg 散射一阶峰关于深水波频散关系对应频点的偏移可推算海面流^[6]. 然而对于平均水深一般小于 5 m 的潮间浅滩, 除了深水条件下所忽略的波浪破碎、底部渗漏等浅水

作用的影响外^[13], 与雷达波海面 Bragg 散射对应波长波浪的波速, 按微幅波理论已偏离深水波频散关系, 据浅水波理论也偏离波速双向同性的假设前提, 成为海面流场高频地波雷达遥感观测经典方法的盲区.

20 世纪 90 年代以来, 中国的高频地波雷达遥感观测技术应用渐为发展^[14-17]. 但东部沿海以强潮宽陆架为特征, 潮间浅滩广为发育, 动力环境相对复杂, 亟待克服海面流场高频地波雷达遥感观测技术盲区影响, 发展适用于潮间浅滩的高时空密度海面流场观测技术. 本文选择潮间浅滩宽达 50 km 的南黄海西部苏北浅滩为研究区, 利用雷达波 Doppler 正频移与负频移信号所建立的方程组, 联解对应海面波浪波速和径向流速, 观测波速与水深的关系, 研究其影响因素, 以期改进经典方法, 将高频地波雷达观测技术运用到潮间浅滩.

1 原理

高频地波雷达朝海面发射的无线电波会沿着海

引用格式: 钟耀照, 李炎, 吴雄斌, 等. 苏北浅滩波浪传播速度的高频地波雷达探测. 科学通报, 2014, 59: 412-418

Zhong Y Z, Li Y, Wu X B, et al. HF Radar detected water wave velocity over the Northern Jiangsu Shoal (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 412-418, doi: 10.1360/972013-361

面传播,经波长为无线电波长一半的波浪散射,发生 Bragg 散射现象,在雷达回波频率谱中表现为高尖峰,称为 Bragg 峰^[2].由于波浪可视为不同方向、周期和波高的许多波浪组分的叠加,当发生 Bragg 散射现象的波浪组分向四面八方传播,其指向或背向雷达基站双向传播的波浪组分所产生的 Doppler 效应,在雷达回波频率谱中表现为关于零频(雷达发射频率)对称的两个 Bragg 峰.若再有海流影响,两个 Bragg 峰则叠加了同向偏移^[3].在该 Doppler 效应模型中,反映指向雷达运动的 Bragg 峰正频移(f_+),以及背向雷达运动的 Bragg 峰负频移(f_-)^[4,5],与海流的径向流速(V_r)、指向雷达传播的波浪组分波速(V_{p+})、背向雷达传播的波浪组分波速(V_{p-})、雷达波长(λ)等物理量之间,存在下列联系:

$$f_+ = \frac{2(V_r + V_{p+})}{\lambda}, \quad (1)$$

$$f_- = \frac{2(V_r - V_{p-})}{\lambda}. \quad (2)$$

若雷达波海面 Bragg 散射对应波长波浪的波速符合各向同性假设,雷达径向上存在满足双向同速条件的波速 $V_p = V_{p+} = V_{p-}$,联立式(1)和(2)可解出径向流速 V_r 与波速 V_p ^[18].在以 f_+ 为 x 轴, f_- 为 y 轴的坐标系中,可经 135° 转轴与镜像变换为以 V_r 与 V_p 为轴的新坐标系.图 1(a)为 26.8 m 波长雷达 f_+ - f_- 坐标系上绘制的 V_r 与 V_p (用对应微幅波理论水深标示)等值线族.其中蓝色实线为径向流速 V_r 等值线;与其正交的红色实线为波速 V_p 等值线,并已按微幅波理论的波速 (V_p)与波浪波数(k)、水深(h)关系^[1]:

$$V_p = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)}, \quad (3)$$

换算为微幅波理论水深值,用红色字体标示. f_+ - f_- 坐标系的第四象限为有效数据采集区间:由式(3)确定

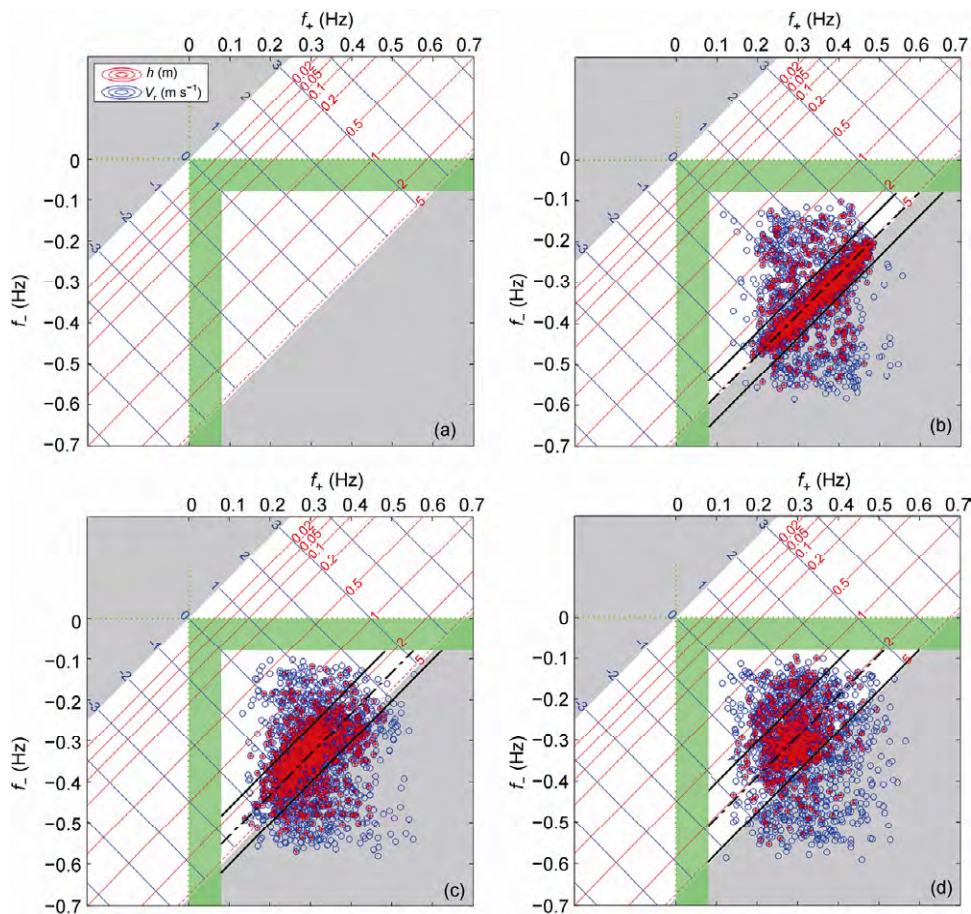


图 1 苏北浅滩典型雷达元的 f_+ - f_- 散点图及 V_r 与 V_p 等值线族

○, 质控前; ●, 质控后; ---, 平均波速; —, 1 倍标准差范围; V_p 用对应微幅波理论水深标示; (a) V_r 与 V_p 等值线族; (b) 深水雷达元 a; (c) 中间水深雷达元 b; (d) 浅水雷达元 c

的 V_p 取值范围为 $(0, \sqrt{g/k})$, 在 $f_+ - f_-$ 坐标系中用白色区间标识; 右下侧的白/灰边界对应 Barrick 经典方法所采用的深水波波速值; 沿两轴平行分布的绿色区间为高频地波雷达 Doppler 频移信号提取算法设置的零频信号抑制条带, 限定了 V_p 测量下界和不同 V_p 条件下的 V_r 测量范围.

2 数据与方法

2.1 高频地波雷达观测

2011年7月1日至8月6日, 厦门大学、武汉大学、南京大学和中国船舶重工集团公司第七二四研究所等4个单位组织了高频地波雷达苏北浅滩联合观测月. 其中, 设于江苏省海安县北凌闸大堤上的基站(站位见图2)安装了中国船舶重工集团公司第七二四研究所的 OS081H 数字化高频地波雷达系统, 工作频率为 11~13 MHz, 中心波长 26.8 m, 三元八木发射天线, 十六单元接收天线, 设计探测开角 120° , 探测角度分辨率为 1° , 距离分辨率为 1.25 km, 输出数据更新率 10 min. 图3与1分别显示了该系统典型的深水雷达元、中间水深雷达元和浅水雷达元(雷达元位置

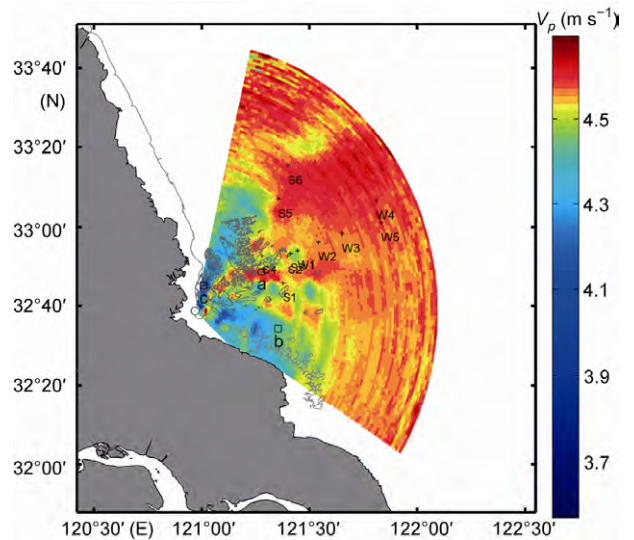


图2 苏北浅滩北凌闸高频地波雷达探测扇区2011年7月平均波速分布图

灰线, Landsat-7 ETM+观测的 2011-07-22 02:24:18 UTC 水边线; ○, 北凌闸雷达基站站位; +, 现场同步观测站 S1~S6 与 W1~W5 站位; □, 典型雷达元 a, b, c 站位

见图2, 离基站距离分别是 38.75, 31.25 和 12.50 km) 在观测月内获得的海面 Doppler 频移 f_+ 和 f_- 时间序列图与 $f_+ - f_-$ 散点图.

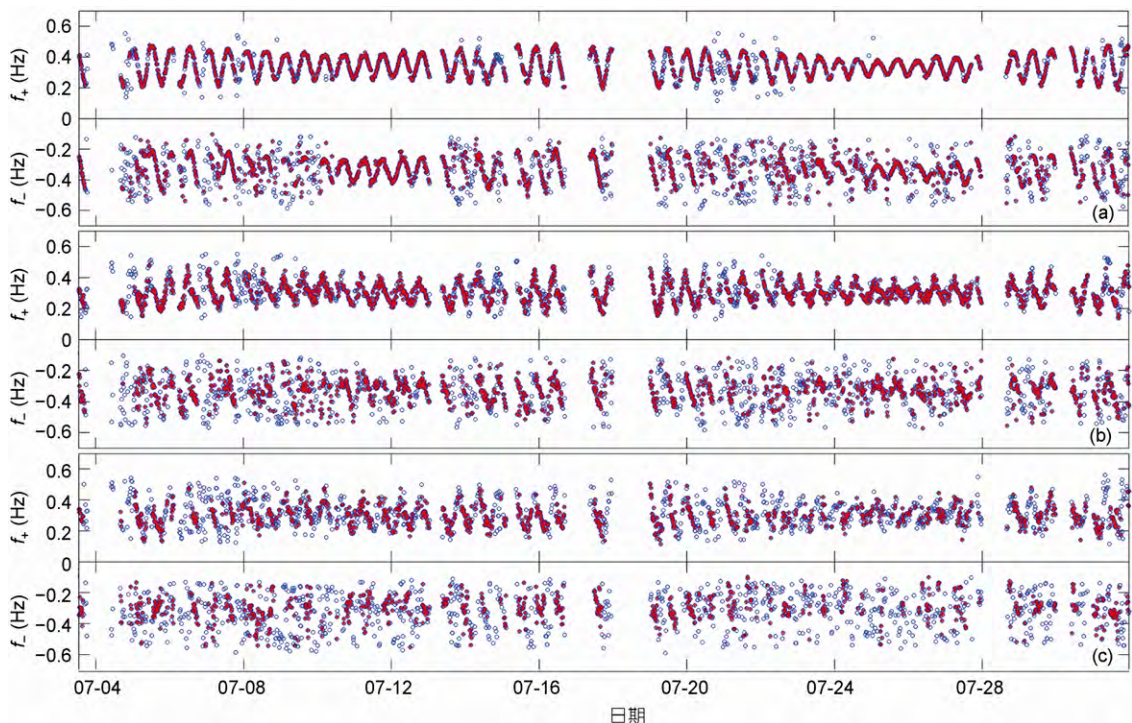


图3 苏北浅滩典型雷达元的 f_+ 和 f_- 时间序列

○, 质控前; ●, 质控后; (a) 深水雷达元 a; (b) 中间水深雷达元 b; (c) 浅水雷达元 c

2.2 数据处理与质量控制

为了减少随机误差的影响,从数据范围合理性、连续性和关联性方面,建立了包括数据预处理、基于频移的一级质量控制、基于波速的二级质量控制的潮间浅滩高频地波雷达数据处理与质量控制流程(图 4)。

数据预处理具有数据格式转换和有效网格截取 2 个功能。针对频移数据时空连续性而设计的一级质量控制,具有空间邻域质控和时间邻域质控 2 个功能:空间邻域质控计算目标雷达元相邻 3×3 网格内雷达元的 f_+ (或 f_-)标准差,剔除超过 2 倍标准差的雷达元;时间邻域质控计算目标雷达元观测时刻 30 min 内的 f_+ (或 f_-)标准差,剔除超过 2 倍标准差的时间点。二级质量控制具有频移散点图绘制、数据转轴变换、观测波速质控 3 个功能:频移散点图绘制在图 1 所示的(f_+ , f_-)坐标系中标出一级质控后各雷达元各时间点的观测散点;数据转轴变换将各雷达元的(f_+ , f_-)数据时间序列变换为(V_r , V_p)数据时间序列;观测波速质控选取观测时间段 1 倍标准差范围内所有 V_p 点,并计算其一阶矩并称之为平均波速(如图 1, 黑色实线间为有效数据范围,黑色点划线是平均波速位置),相当于针对 f_+ 数据与 f_- 数据的关联性检验。

经上述数据处理与质量控制后的典型正频移 f_+ 和负频移 f_- 时间序列(图 3)可见,负频移信号质量差于正频移。根据误差传递原理,联立式(1)和(2)解出的径向流速 V_r 与波速 V_p 数据误差将受控于负频移。图 3 还说明,浅水雷达元的信号质量差于深水雷达元。前人研究发现的海面回波谱高阶信号随水深变浅而

增强现象^[13,19],很可能抑制一阶谱峰信号,导致浅水雷达元信号质量降低。

2.3 检验数据集

联合观测月还在高频地波雷达探测扇区内设置了 S1~S6 和 W1~W5 共 11 个现场同步观测站(图 2),于 2011 年 7 月 1~4 日(大潮)及 7~10 日(小潮)分别进行了 25 h 连续站全潮水文观测,采用具有底跟踪功能的 ADCP 测量流速与水深。由于雷达所反演的海面流速表征 $\lambda/8\pi$ 深度处(约为 1.1 m)的流速^[5],取 ADCP 测量的第一层(位于海面下 1.55 ± 0.41 m)流速投影为对应雷达元的现场径向流速 $V_{r,obs}$,与高频地波雷达系统同步观测并经数据处理与质量控制流程的 f_+ 与 f_- ,根据式(1)和(2)分别计算对应的 V_{p+} 和 V_{p-} ,根据双向同速假设由式(1)和(2)联解高频地波雷达观测径向流速 V_r 与波速 V_p ,加上 ADCP 现场观测水深 h ,汇集成由高频地波雷达系统和现场观测站联合获取的检验数据集(V_r , $V_{r,obs}$, V_p , V_{p+} , V_{p-} , h)。由于试验初期大潮阶段部分雷达数据缺测,检验数据集的大潮阶段代表性有所不足。

3 结果与讨论

3.1 苏北浅滩的雷达观测平均波速分布

图 2 为苏北浅滩北凌闸高频地波雷达探测扇区的 2011 年 7 月平均波速分布图,表现了对 26.8 m 波长雷达波产生 Bragg 散射的 13.4 m 波长波浪的波速平面变化规律(根据微幅波理论计算,该波长波浪的深水波波速约为 4.6 m s^{-1})。图中最小平均波速接近 3.6 m s^{-1} ,主要出现在近岸区域;最大平均波速约为 4.6 m s^{-1} ,主要分布于离岸 50 km 以外的远岸区域。比较 1979 年测量的苏北浅滩海图^[20],以平均波速 4.5 m s^{-1} 的等值线为界,雷达探测扇区可大致分为外侧的高波速区和近岸侧的低波速区,分别对应水下岸坡和潮间浅滩。平均波速 4.5 m s^{-1} 等值线还可在低波速区内细分出若干相对高波速带与相对低波速带。

(1) 北凌闸外高波速带。由雷达站南侧的北凌闸口排洪沟起,先向东北方向延伸 20 km 后渐转东向再延伸 60 km 有余,宽度由 1 km 左右逐渐增至近 10 km,形成蛇曲分布的高波速带。带内平均波速多为 4.6 m s^{-1} 。比较 2011 年 7 月 22 日 Landsat-7 ETM+图像所显示的低潮时水边线,该高波速带主轴沿干出滩间

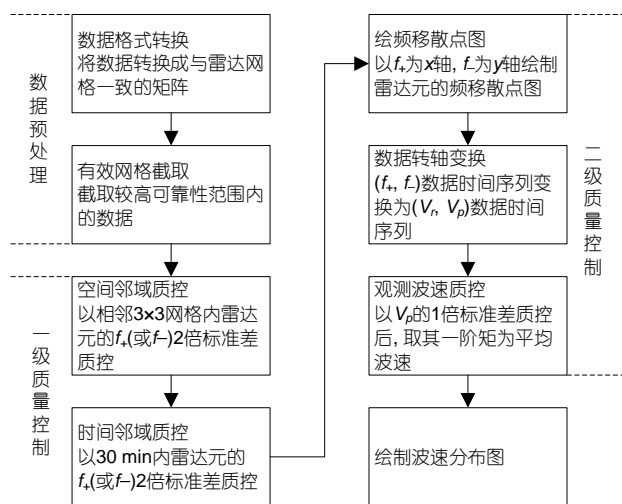


图 4 潮间浅滩高频地波雷达数据处理与质量控制流程

的潮汐水道主槽延伸。

(2) 北侧高波速带. 在北凌闸外高波速带东向延伸段北侧约 10 km 处发育, 先东向延伸 15 km 后遂近直角转北向延伸近 30 km, 汇入测区东北的大片高波速区内. 该带宽度约 5 km, 带内平均波速 4.5~4.6 m s⁻¹ 但明显起伏. 北侧高波速带与北凌闸外高波速带之间还有一宽 1 km 余、平均波速略高于 4.5 m s⁻¹ 的潮汐水道相连, 形成辫状联系。

(3) 南侧高波速带. 在北凌闸外高波速带东向延伸段南侧约 15 km 处东偏南向延伸 35 km 后转东北向延伸近 20 km, 末端逐渐靠近北凌闸外高波速带. 该带宽度约 3~7 km, 带内平均波速多为 4.5 m s⁻¹ 左右, 但常为低于该波速的低速段所阻. 南侧高波速带与北凌闸外高波速带之间也有一宽 1 km 余, 平均波速略高于 4.5 m s⁻¹ 的潮汐水道相连, 形成辫状联系。

(4) 北侧低波速带. 发育于北凌闸外高波速带东北向延伸段与北侧高波速带连线的西北侧, 沿北北东方向延伸约 50 km 后, 区内宽度 12~30 km, 平均波速 3.8~4.4 m s⁻¹. 该低波速带在同期低潮时水边线遥感图像上显示为一系列岛状干出滩。

(5) 南侧低波速带. 发育于北凌闸外高波速带东北向延伸段的东南侧, 向东偏南方向延伸 50 km 有余, 区内宽度 8~30 km, 平均波速 3.9~4.4 m s⁻¹. 该低波速带出现于同期低潮时水边线遥感图像可见的沿岸连片干出滩前沿。

此外, 北侧高波速带与北凌闸外高波速带之间, 以及北凌闸外高波速带与南侧高波速带之间, 还散布着若干雁行排列的, 空间尺度各不足 10 km × 10 km, 平均波速为 4.3~4.4 m s⁻¹ 的低波速小区, 在同期低潮时水边线遥感图像上显示为一系列小规模岛状干出滩发育。

3.2 波速与水深的关系

苏北浅滩雷达观测平均波速分布图(图 2)所表现出的高波速区(带)、低波速区(带)分布格局, 与 1979 年测量的苏北浅滩海图^[20], 以及 2011 年夏季同期 Landsat-7 ETM+图像上干出滩形态所显示的潮间浅滩、水下岸坡和潮汐水道等浅滩地形单元, 具有平面分布上的关联性: 高波速区(带)具有较大水深, 低波速区(带)则对应于较浅水深, 趋势上符合微幅波理论导出的式(3)。

比较检验数据集的(h, V_p)散点与式(3)描述的微

幅波理论 V_p - h 曲线(图 5(a)), 数据质量控制后的雷达观测波速 V_p 在微幅波理论 V_p - h 曲线两侧 ± 0.4 m s⁻¹ 范围内散布, 其分布中心在微幅波理论 V_p - h 曲线附近, 与 Li 等人^[18]在福建沿海深水波条件下的观测结果(90%置信水平下的绝对误差为 0.33 m s⁻¹)相近. 显然经过二级质量控制后统计得到的平均波速, 所对应的水深统计值基本符合微幅波理论, 借图 2 一类波速统计成果可遥感监测潮间浅滩水深的动态。

出于安全考虑, 现场观测站位多设于潮汐水道内, 以致检验数据集的水深 h 取值范围(4~20 m)多数落于或接近微幅波理论 V_p - h 曲线中的深水波区间, 未对水深小于 4 m 但地形起伏比较小的一类潮间浅滩进行检验。

3.3 径向流对波速观测的影响

比较检验数据集的(V_{r_obs}, V_p)散点与微幅波理论 V_p - h 曲线上界(图 5(b)), 数据质量控制后的雷达观测波速 V_p 在微幅波理论 V_p - h 曲线上界附近分布, 但径

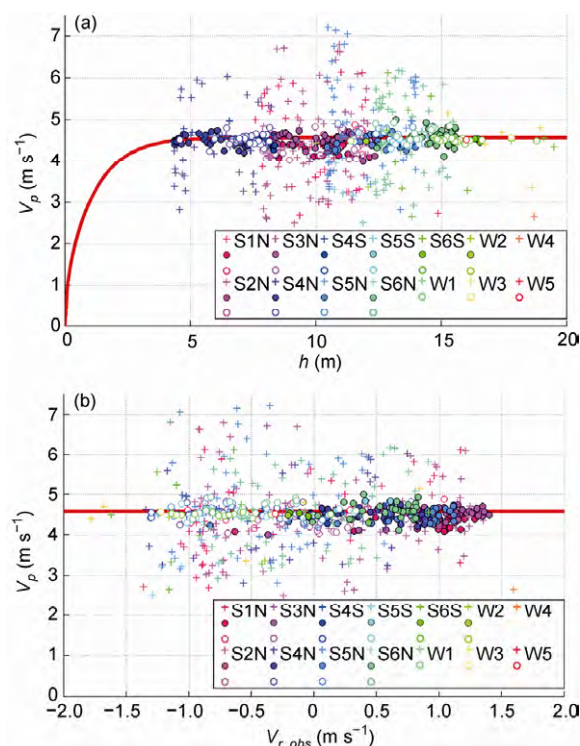


图 5 苏北浅滩现场观测站水深(a)和径向流速(b)与雷达观测波速散点图

观测站: S1~S6, W1~W5; h , 水深; V_{r_obs} , 径向流速; V_p , 雷达观测波速; $\circ, V_r < 0$; $\bullet, V_r > 0$; $+$, 未通过质控; (a)中红线为微幅波理论 V_p - h 曲线; (b)中红横线为微幅波理论 V_p - h 曲线上界

向流速绝对值小于 1 m s^{-1} 时的波速分布范围比径向流速绝对值大于 1 m s^{-1} 时较为离散。径向流速较大条件下获取的雷达观测波速比较稳定，优先利用涨急和落急时段的观测数据可以较好地保证统计波速精度。

3.4 双向波速不等现象对波速观测的影响

将检验数据集内指向雷达传播的波浪组分波速 V_{p+} 除以背向雷达传播的波浪组分波速 V_{p-} ，可导出径向上的双向波速比 V_{p+}/V_{p-} 。双向波速比等于 1 时，满足联立式(1)和(2)解出 V_r 与 V_p 所需的波速各向同性假设。

比较检验数据集(V_{p+}/V_{p-} , V_p)散点与双向同速条件及微幅波理论 V_p-h 曲线上界的符合情况(图 6)，双向波速不等是导致雷达观测波速 V_p 偏离微幅波理论 V_p-h 曲线的主要因素之一。双向波速比 V_{p+}/V_{p-} 在接近 1 的 0.8~1.2 区间时，雷达观测波速 V_p 分布中心稳定于微幅波理论 V_p-h 曲线上界。双向波速比 V_{p+}/V_{p-}

为 0.5~0.8 时，雷达观测波速 V_p 分布中心低于微幅波理论 V_p-h 曲线上界，这种负偏差现象主要出现在径向流背向雷达($V_{r,obs} < 0$)的条件下(图 6(a))。双向波速比 V_{p+}/V_{p-} 在 1.2~1.8 时，雷达观测波速 V_p 分布中心也低于微幅波理论 V_p-h 曲线上界，但径向流指向雷达($V_{r,obs} > 0$)时有利于该视在负偏差现象强化(图 6(b))。

双向波速不等与其所致雷达观测波速负偏差的现象，在位于低波速与高波速交界的 S2 和 S3 两站比较明显(图 6(c), (d))，可能与潮汐水道辫状联系通道的地形影响有关。两站 $V_{r,obs} > 0$ 条件下 $V_{p+} > V_{p-}$ ，以及 $V_{r,obs} < 0$ 条件下 $V_{p+} < V_{p-}$ 的趋势，可由浅水波理论溃坝波问题 Ritter 解^[1]所表述的水流方向上波速加速现象所解析。双向波速不等现象明显影响着复杂地形条件下的雷达观测波速精度。

4 结论

通过雷达波 Doppler 正频移与负频移信号联解波速和径向流速的方法，可直接应用高频地波雷达观测苏北浅滩海面波速。

经过基于 Doppler 频移和波速两级数据质量控制后统计的平均波速，可分辨与潮间浅滩、水下岸坡和潮汐水道等浅滩地形单元相关的低波速区(带)、高波速区(带)格局。

高频地波雷达系统和现场观测站联合获取的检验数据集说明：雷达观测平均波速与水深的关系基本符合微幅波理论；径向流速绝对值较大时的雷达观测波速数据质量较好；双向波速不等现象导致复杂地形条件下的雷达观测波速精度下降。

雷达波 Doppler 正频移与负频移信号联解方法将高频地波雷达观测能力拓展到潮间浅滩，但因此也导致反演质量明显受制于信噪比较差的负频移。提高离岸波回波信号质量，发展更加针对性的数据质量控制流程，可以使高频地波雷达遥感观测技术成为潮间浅滩水深动态实时监测的一种重要手段。

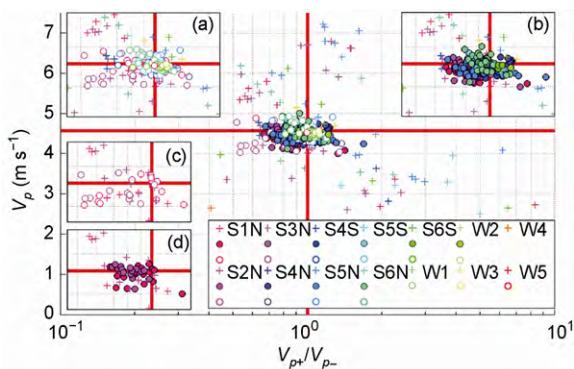


图 6 苏北浅滩现场观测与雷达联合观测的双向波速比与雷达观测波速散点图

观测站: S1~S6, W1~W5; V_{p+}/V_{p-} , 波速比; V_p , 雷达观测波速; \circ , $V_r < 0$; \bullet , $V_r > 0$; +, 未通过质控; (a) $V_r < 0$ (S1~S6, W1~W5); (b) $V_r > 0$ (S1~S6, W1~W5); (c) $V_r < 0$ (S2, S3); (d) $V_r > 0$ (S2, S3); 红横线为微幅波理论 V_p-h 曲线上界, 红竖线满足双向同速条件

致谢

感谢江苏省海安县海洋与渔业局、中洋集团海安特种水产养殖基地、大丰港务局、如东沿海经济开发区管理委员会等单位对联合观测试验的现场支持，USGS 在同期 Landsat 遥感图像方面的支持，武汉大学、南京大学、中国船舶重工集团公司第七二四研究所、中南鹏力公司和厦门大学参加苏北浅滩高频地波雷达联合观测试验月的老师、学生和技术人员们的支持。

参考文献

- 1 余锡平. 近岸水波的解析理论. 北京: 科学出版社, 2012
- 2 Crombie D D. Doppler spectrum of sea echo at 13.56Mc/s. *Nature*, 1955, 175: 681–682
- 3 Barrick D E. First order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea. *IEEE Trans Antennas Propagation*, 1972, AP-20: 2–10
- 4 Barrick D E. Remote sensing of sea state by radar. In: *Engineering in the Ocean Environment, Ocean 72-IEEE International Conference on. IEEE*, 1972. 186–192
- 5 Robert H S, Joseph W J. HF radio measurements of surface currents. In: *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1974, 21: 1039–1049
- 6 Barrick D E, Evans M W. Implementation of coastal current-mapping HF radar system. Progress Report No. 1, NOAA Technical Report ERL 373-WPL 47, Boulder Co. 1976
- 7 Herr F, Luther C, Marmorino G O, et al. Science plan for the High Resolution Remote Sensing Program. *EOS*, 1991, 72: 214
- 8 Shay L K, Ross D B, Graber H C. Ocean surface current profiling using HF radar. RSMAS Tech. TR92-004, Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami. 1992
- 9 候杰昌, 吴世才, 杨子杰, 等. 海洋表面流的高频地波雷达遥感. *地球物理学报*, 1997, 40: 18–26
- 10 吴雄斌, 杨绍麟, 程丰, 等. 高频地波雷达东海海洋表面矢量流探测试验. *地球物理学报*, 2003, 46: 340–346
- 11 Kohut J, Glenn S, Barrick D E. Seasonal integral to coastal flow model development. *Hydrol Int*, 1999, 3: 32–35
- 12 Emery M B, Washburn L, Harlan J A. Evaluating radial current measurements from CODAR high-frequency radars with moored current meters. *J Atmos Ocean Technol*, 2004, 21: 1259–1271
- 13 Barrick D E, Lipa B J. The second-order shallow-water hydrodynamic coupling coefficient in interpretation of HF radar sea echo. *IEEE J Ocean Eng*, 1986, 11: 310–315
- 14 朱大勇, 邵浩, 李炎, 等. OSMAR 高频地波雷达福建示范系统径向流数据质量分析. *台湾海峡*, 2006, 26: 7–16
- 15 朱大勇, 李立, 李炎, 等. 台湾海峡西南部表层海流季节变化的地波雷达观测. *科学通报*, 2008, 53: 1339–1344
- 16 Fujii S, Heron M L, Kim K, et al. An overview of developments and applications of oceanographic radar networks in Asia and Oceania countries. *Ocean Sci J*, 2013, 48: 69–97
- 17 朱大勇, 李立, 郭小钢. 台湾海峡南部浅滩以西表层流场的季节与年际变化. *科学通报*, 2013, 58: 2737–2744
- 18 Li L, Wu X B, Xu X A, et al. Ocean gravity wave phase velocity detection by HFSWR. *IEICE Electron Express*, 2012, 9: 724–730
- 19 Lipa B J, Nyden B B, Barrick D E, et al. HF radar sea-echo from shallow water. *Sensors*, 2008, 8: 4611–4635
- 20 王颖. 黄海陆架辐射沙脊群. 北京: 中国环境科学出版社, 2002

HF Radar detected water wave velocity over the Northern Jiangu Shoal

ZHONG YaoZhao¹, LI Yan¹, WU XiongBin², GAO Shu³, ZHOU Tao⁴, WANG YaPing³ & GAO JianHua³

¹Fujian Provincial Key Laboratory for Coastal Ecology and Environmental Studies, Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

²Electronic Information Institute of Wuhan University, Wuhan 430072, China;

³School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

⁴The 724 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Nanjing 210003, China

High-frequency (HF) radar systems can provide wave velocity and radial current by identifying and tracking frequency shifts in the peaks of the Doppler spectra of the ocean backscatter corresponding to the advection of the Bragg wave. Data used in this study was collected by HF radar experiment for the Northern Jiangu Shoal in July 2011. A distribution of monthly average wave velocity was generated with data that is quality controlled particularly. The intertidal flat, offshore shoal and tidal channel, associated with low speed area, high speed area and high speed belt respectively, could be distinguished by the HF radar mapped wave velocity distribution. After compared with datasets of field measurement and calculate results, it is revealed that (1) the relationship between water depth and monthly average wave velocity fits the theory of Airy Wave, (2) large radial currents may rise measurement accuracy of wave velocity, and (3) mismatch of approaching and leaving wave velocity related to complex topography may reduce measurement accuracy.

marine remote sensing, HF radar, wave velocity, water depth, intertidal flat

doi: 10.1360/972013-361