0254-6124/2018/38(4)-508–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LU Zhuanxia, LI Xue, LI Jining, HUA Caicheng, LÜ Zhe. Reconstruction of the typhoon center and wind speed distribution using HF sky-wave backscatter spectrum (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(4): 508-516. DOI:10.11728/cjss2018.04.508

利用高频天波返回散射反演台风中心和风速*

鲁转侠 李 雪 李吉宁 华彩成 吕 哲

(中国电波传播研究所 青岛 266107)

摘 要 通过分析高频天波返回散射地 (海) 杂波频谱分布特性, 构建三谱滤波器模型, 实现多类型频谱中一阶海杂波峰值比的提取, 结果与实测数据吻合较好. 基于台风中心与区域一阶海杂波峰值比相关性分析, 结合后向差分法, 有效确定了台风中心, 结果与气象部门发布数据趋势上基本一致, 平均绝对误差约 38 km. 使用修正经验模型法初步开展了台风中心最大风速和台风中心附近的风速反演, 结果与气象部门发布数据分布基本一致. 研究结果表明高频天波返回散射探测对大范围、远距离海态监测具有重要意义.

关键词 高频返回散射, 海杂波, 后向差分, 布拉格峰

中图分类号 P 352

Reconstruction of the Typhoon Center and Wind Speed Distribution Using HF Sky-wave Backscatter Spectrum

LU Zhuanxia LI Xue LI Jining HUA Caicheng LÜ Zhe

(*China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao* 266107)

Abstract By analyzing the distribution characteristics of HF sky-wave backscatter clutter spectrum, the three-spectrum filter model is constructed to extract the Bragg line ratio in multi-type spectrum. The extractions are in good agreement with the measurements. Combining the backward difference method, the Typhoon center has been determined effectively on the basis of the correlation analysis of Typhoon center and the Bragg line ratio. The results are basically in line with the data released by the meteorological department. The average absolute error is about 38 km. Using the modified empirical model, the maximum wind speed in Typhoon center and the wind speed near Typhoon center are preliminarily investigated. The reversions are basically consistent with the data released by the meteorological department. The results show that HF sky-wave backscatter sounding is of great significance and application value for state monitoring of the sea with wide range and long distance.

Key words HF backscatter, Sea clutter, Backward difference, Bragg peak

* 国家海洋局海洋遥测工程技术研究中心创新青年基金项目和 2016 年环渤海区域科技协同创新基金项目 (QYXM201606) 共同资助

2017-07-11 收到原稿, 2017-11-27 收到修定稿

E-mail: zhuanxialu@163.com

0 引言

随着现代科技的不断发展, 海面风向、风速等海态, 特别是台风等异常海态与人类生活密切相关. 无线电海洋学已发展成新的重要科学分支. 天波返回散射传播是无线电波斜向投射到电离层, 被折射到远方地 (海) 面, 地 (海) 面的起伏不平及其电气特性不均匀性使电波向四面八方散射, 有一部分电波将沿着原来的路径再次经电离层折射回到发射点, 被位于该处的接收机接收. 高频天波雷达利用电离层返回散射传播方式可实现对 800~3500 km 的地 (海) 面特性监测, 覆盖范围达几百万平方千米 [1]. 与现有卫星、浮标、测量船、侦察飞机等海态监测手段相比, 高频天波雷达具有造价低、遥感区域大、监测时间连续、精度及空间分辨率高等优点.

1955 年 Crombic 等 [2] 提出了海洋回波物理机制, 1972 年 Barrick 等 [3] 建立了高频海洋散射理论. 在上述理论研究的基础上, 开展了深入的高频天波海态反演理论 [4−6] 及实验研究, 通过反演参数绘制海面风场 [7−12]、浪场 [13,14] 及流场 [15], 跟踪海面台风 [16−18]. 1978 年中国电波传播研究所首次在河南新乡向南开展了返回散射探测实验 [19], 获得高频返回散射回波频谱数据. 1986 年 Jiao 等 [20] 对短波雷达遥感海洋状态的优势、可行性及应用前景进行了分析. 1997 年 fan 等 [21] 基于 Barrick 高频雷达海洋散射理论, 开发了一种多功能高频雷达海洋回波谱模拟软件. 1998 年 Jiao 等 [22] 提出低成本天波海态雷达概念, 指出一阶海杂波能量高于军用目标能量近 40 dB, 可大幅度降低雷达规模和成本, 能够监测大范围海态. 2004 年 Jiao 等 [23] 基于中国电波传播研究所高频天波返回散射探测设备, 首次获得天波陆地/海洋回波谱试验数据, 并初步估算了海态参数风向和流速. 2009 年 Jiao 等 [24] 利用中国电波传播研究所高频返回散射试验数据, 开展了台风跟踪初步实验研究.

基于中国电波传播研究所高频返回散射试验数据, 开展天波海态参数反演技术研究. 首先通过分析天波返回散射探测海杂波频谱特性, 构建基于三谱滤波器的一阶海杂波特征参数提取算法; 然后基于海杂波提取特征参数, 分析台风中心位置与区域一阶海杂波峰值比的相关性, 建立基于后向差分法的台风中心识别方法; 最后采用经验模型初步反演台风中心最大风速和台风中心附近风速分布.

1 高频天波返回散射台风反演方法

1.1 一阶海杂波峰值比提取方法

高频天波海面风场风向反演的基本原理为：海杂波多普勒谱正负一阶布拉格峰分别对应于背向波束方向和沿着波束方向的两列海浪; 两个布拉格峰的强度大小反应了风向, 当正的布拉格峰大于负的时, 表现为风向背向波束方向, 相反则表现为风向沿波束方向; 两个峰值相同时, 风向横向于波束. 风向反演的经验关系 [4,25] 为

$$\theta_{\mathrm{w}}(k',n')=\theta_0(n')\pm\cdots 2\arctan[10^{R(k',n')/(10\,s)}]. \quad (1)$$

其中: $\theta_{\mathrm{w}}(\cdot)$ 为风向, $\theta_0(\cdot)$ 为天波雷达波束方位角, 均相对于正北方向; $R(\cdot)$ 为正负一阶海杂波峰值比; $n'=1,2,\cdots,N'-1$; $k'=1,2,\cdots,K'$; N' 为接收波束合成后的波束个数, K' 为距离单元个数; s 为浪高方向谱中的扩展因子. 通常海况下, s 在 [0, 16] 内变换, 典型值是 4. 由式 (1) 可见, 正负一阶海杂波峰值比的准确提取直接影响海面风向反演的精确性.

电离层平静时天波返回散射探测地 (海) 杂波频谱特性 [1] 如下. 地杂波峰值位于多普勒 0 Hz 处, 一阶海杂波由两个对称于 0 Hz 的尖峰构成, 这两个尖峰对雷达载频频谱 (0 Hz) 的偏移以相同规律随载频平方根变化, 振幅不一定相同.

结合上述杂波频谱分布特征, 设计三谱滤波器如图 1 所示, f_{b} 为布拉格频率, f_{t} 为地杂波频率. 对筛选、预处理后数据每一群距离单元、不同多普勒频率遍历, 计算滤波器中心位置为每个多普勒频率时的滤波器中散射函数之和 $A(k,n)$, 其具体表达式为

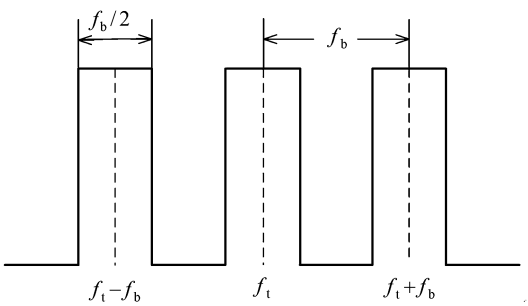


图 1 三谱滤波器

Fig. 1 Three-spectrum filter

$$A(k,n)=\sum_{m=n-(M+M')}^{n-(M-M')}S(k,m)+\cdots+\sum_{m=n-M'}^{n+M'}S(k,m)+\sum_{m=n+(M-M')}^{n+(M+M')}S(k,m),\tag{2}$$

$$M=f_{\mathrm{b}}TN,\tag{3}$$

$$M'=\frac{f_{\mathrm{b}}}{2}TN,\tag{4}$$

$$f_{\mathrm{b}}=0.102\sqrt{f}.\tag{5}$$

其中: $n=(M+M'+1),(M+M'+2),\cdots,(N-M-M')$; $k=1,2,\cdots,K$, 这里 K 为群距离单元个数; N 为定频积累次数, 即多普勒频点数; T 为脉冲重复周期; f_{b} 为布拉格频率, 单位为 Hz; f 为探测工作频率, 单位为 MHz; $S(\cdot)$ 为不同距离单元、不同多普勒频率对应散射函数值.

搜寻每个距离单元 $A(k,n)$ 的最大值 $G(k)$, 并记录最大值 $G(k)$ 对应的三谱滤波器中海杂波、地杂波范围内的散射函数最大值及二者对应的多普勒频率, 具体表达式为

$$G(k)=\max\left[A(k,n)\right].\tag{6}$$

每个距离单元 $G(k)$ 值对应的三谱滤波器海杂波、地杂波范围内的散射函数最大值分别为正、负布拉格峰和地杂波幅度, 对应多普勒频率为正、负布拉格峰和地杂波频率.

最后基于每个距离单元的背景噪声值, 对正、负布拉格峰和地杂波信号幅度进行有效性判断, 并判断杂波类型, 得出相应的群距离门上存在的杂波类型 (地/海杂波均有或仅有海杂波).

此外, 地 (海) 杂波信号通常集中在一定的多普勒频率范围内. 经统计, 电离层平稳状态下, 地 (海) 杂波信号的多普勒频率一般处于 $-4\sim4$ Hz 范围内. 因此, 需要根据杂波分布经验参数进一步确定地 (海) 杂波提取信息的有效性. 基于上述海杂波信号幅度提取结果, 计算一阶海杂波峰值比.

1.2 台风中心与一阶海杂波峰值比相关性

由式 (1) 可见, 如果利用一部雷达探测一个方向, 从回波中只能得到风向与雷达的夹角, 且无法判断此夹角是在雷达的左侧还是右侧, 即风向存在不确定性. 传统通过反演风场结果判断台风中心位置的方法因风向不确定性导致误差增大或基本失效. 基于高频天波海杂波特性分析, 研究台风中心位置与一阶海杂波幅度分布之间的关系, 从而确定台风中心位置. 如 Georges 等 [18] 提出利用一阶海杂波峰值比相对于雷达方位角导数的方法. Jiao 等 [26] 提出对每个波束上所有距离单元的一阶海杂波峰值比求和, 取正负交界的两个波束之间为台风中心位置.

这里通过分析高频天波一阶海杂波峰值比分布特性和气象部门公布的台风中心位置数据, 提出基于后向差分法的台风中心位置确定方法. 首先计算一阶海杂波峰值比的修正差分值

$$F(k',n')=[R(k',n'+1)-R(k',n')]/\Delta.\tag{7}$$

其中: $n'=1,2,\cdots,N'-1$; $k'=1,2,\cdots,K'$; N' 为接收波束合成后的波束个数; K' 为距离单元个数; Δ 为波束方位间隔; $F(\cdot)$ 为不同波束、不同距离单元修正差分值.

搜寻修正差分值的最大值 Z, 有

$$Z=\max\left[F(k',n')\right].\tag{8}$$

最大值 Z 对应的波束和距离单元即为台风中心所在位置.

1.3 台风中心附近最大风速和风速分布反演

台风是热带低气压漩涡, 低气压中心气流由四周流向低压中心. 在北半球受地转偏向力的影响, 四周流向低压中心的气流出现右偏, 形成逆时针方向旋转的气流漩涡, 即北半球台风风区风向逆时针旋转分布, 从而解决了风向不确定性问题.

台风风速受台风中心气压、外围气压, 摩擦系数, 环境温度等多种因素影响. 仅通过高频天波探测无法估计和补偿这些因素. Ross 等 [26,27] 和 Cardone 等 [28] 提出构建经验模型计算台风中心附近的最大风速. 这里基于 Ross 和 Cardone 提出的飓风能量经验定律, 利用高频天波返回散射 5 次历史台风期间的试验数据, 生成的修正经验模型如下:

$$\tilde{E}=0.5\times10^{-5}(rg/W^2)^{0.45},\tag{9}$$

$$\tilde{E}=Eg^2/W^4,\tag{10}$$

$$E=h_{\mathrm{s}}^2.\tag{11}$$

式中, $\tilde{E}$ 为用风、浪表示的无量纲海浪能量, E 为海浪总能量, h_{s} 为有效浪高, r 为台风中心到探测站的径向距离, g 为重力加速度, W 为台风中心附近最大风速. 根据式 (9)~(11), 推导出最大风速 W 的表达式为

$$W=\Big[\frac{h_{\mathrm{s}}^2g^2}{0.5\times10^{-5}(rg)^{0.52}}\Big]^{0.323}. \tag{12}$$

其中, h_{s} 为有效浪高. 基于 Barrick 浪高反演方法 [29] 计算有效浪高的表达式为

$$h_{\mathrm{s}}=\frac{40.8}{k_0}Q^{0.6}. \tag{13}$$

式中, k_0 为波数, $k_0=2\pi/\lambda$, λ 为探测波长, Q 为二阶谱能量积分与一阶谱能量积分的无权重比值 [29], 其计算表达式为

$$Q=\frac{\int_{-\infty}^{\infty}\sigma^{(2)}(\omega)\mathrm{d}\omega}{\int_{-\infty}^{\infty}\sigma^{(1)}(\omega)\mathrm{d}\omega}. \tag{14}$$

其中 ω 为多普勒角频率.

台风中心区域风速低, 随着离台风中心距离的增加, 风速逐渐增大至最大风速, 然后又逐渐减小. 这里采用的台风中心附近风区风速计算模型 [30] 为

$$V=\begin{cases}W\Big(\dfrac{D}{D_{\max}}\Big)^{0.5}, & D<D_{\max};\\[2ex] W\Big(\dfrac{D_{\max}}{D}\Big)^{0.5}, & D\geqslant D_{\max}.\end{cases} \tag{15}$$

式中, D 为以台风中心为圆点的半径, $D_{\max}$ 为最大风速半径.

2 数据处理分析

高频天波返回散射回波要经过两次电离层传播和一次地 (海) 面散射, 同时受探测波束宽度、积累时间等因素影响, 接收到的杂波谱通常存在不同程度的展宽、频移及多峰现象. 此外, 干扰和噪声也会引起杂波谱一定程度上的模糊难辨. 在天波台风跟踪研究中, Georges 等 [18] 和 Jiao 等 [26] 均提出在提取一阶海杂波峰值比之前需要进行高质量频谱数据的筛选预处理. 目前使用的预处理方法有频谱质量因子和人工分类两种.

这里采用信噪比和杂波频率/群距离分布范围作为筛选数据的主要依据. 提取正负一阶海杂波峰值比前, 首先剔除掉瞬态干扰多、杂噪比低、一阶海杂波展宽 (峰值下降 15 dB 处平均值) 较大的频谱数据, 然后对每个群距离单元进行若干个非相关群距离单元谱的平均处理, 以平滑海面和电离层运动带来的谱幅度随机性变化.

具体数据处理流程如下.

(1) 基于信噪比和杂波频率/群距离分布范围, 筛选质量较高的探测频谱数据.

(2) 对挑选的频谱数据, 每个群距离单元进行若干 (这里取 5 个) 非相关群距离单元谱平均预处理.

(3) 构建三谱滤波器, 通过群距离、多普勒频率滑动, 遍历提取每个波束上的正负一阶海杂波峰值、峰值对应多普勒频率、峰值比等海杂波信息, 并将距探测站的群距离转换为距离.

(4) 采用移动平均方法, 在波束和距离上对正负一阶海杂波峰值比进行二维平滑处理.

(5) 滤除正负一阶海杂波峰值比中的奇异点.

(6) 计算波束上正负一阶海杂波峰值比和的梯度, 搜寻梯度最大的波束.

(7) 由于高频天波照射海面范围较大, 为提高台风中心位置识别的准确性, 以梯度最大的波束为基准中心, 设定台风中心位置识别分析的波束范围 (10 个) 和距离范围 (500 km).

(8) 在设定范围内, 计算正负一阶海杂波峰值比在波束上的修正差分值.

(9) 搜寻修正差分值中的最大值, 其对应波束方位和距探测站距离记录为台风中心位置, 进而获取台风中心位置的经纬度.

(10) 基于探测频谱数据, 提取海杂波信息和反演台风中心位置信息, 使用式 (12) 计算台风中心位置的有效浪高.

(11) 基于台风中心位置的有效浪高信息, 使用式 (11) 修正经验模型计算台风中心附近的最大风速.

(12) 基于台风中心附近的最大风速, 使用式 (14) 计算台风中心附近的风速分布信息.

3 结果分析

台风莫拉克于 2009 年 8 月 4 日 02:00 LT 在菲律宾东北部海面生成, 然后向西即中国方向移动, 到达福建省东部海域后向北发展, 经过中国沿海多省. 本文试验系统为中国电波传播研究所研制的收发分置的高频返回散射试验雷达, 系统工作模式包括扫频和

定频两种. 选取 2009 年 8 月 5−7 日的高频天波返回散射试验数据 (见图 2), 信号形式为线性调频脉冲信号, 定频工作频率范围为 11~13 MHz, 脉冲发射功率为 6 kHz, 脉冲重复周期为 50 ms. 采用上述数据处理分析方法, 提取正负一阶海杂波和地杂波信号如图 3 红色、黑色、白色实线所示. 由图 3 可以看出, 提取的信号与实测数据吻合较好. 因此, 三谱滤波器方法能够较为准确、合理地识别出不同类型频谱中的地 (海) 杂波信息.

图 4 为通过构建的三谱滤波器滑动遍历提取的一阶海杂波峰值比分布情况. 由于受台风影响, 正负一阶海杂波峰值比在波束上存在显著变化, 具体变化范围约为 −15~25 dB, 如图 5 所示.

基于图 5 数据计算波束修正差分值的等值线, 如图 6 所示. 其中的红色十字为修正差分值最大值位置, 即反演的台风中心位置.

图 7(a) 为反演的台风莫拉克中心位置, 趋势上与气象部门公布的台风路径 (细黑实线) 基本一致, 与气象部门公布的邻近时刻台风中心位置在方位和距离上均存在一定误差, 平均绝对误差约为 34 km, 具体列于表 1. 目前国内外利用高频天波跟踪台风, 反演台风中心位置的平均绝对误差约为 30~60 km[16−18,25]. 误差产生的主要原因: 一是气象部门每 2 h (或更长时间) 公布一次数据, 在时间上与试验数据时间间隔较大; 二是受电离层运动影响, 群距离与大圆距离变换系数不精确; 三是试验系统设备能力有限.

选取 2007 年 10 月 5 日至 6 日台风罗莎期间的高频天波返回散射试验数据, 反演的台风中心位置如图 7(b) 所示, 反演台风中心位置的平均绝对误差约为 41 km, 具体列于表 2.

选取台风莫拉克期间 2009 年 8 月 7 日 9 时 37

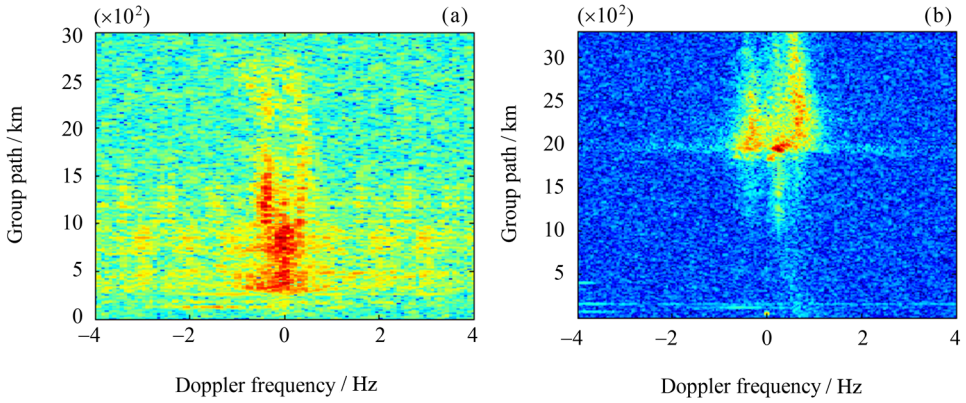


图 2 电离层 F 层一跳 (a) 和两跳 (b) 杂波谱

Fig. 2 F layer first-hop (a) and second-hop (b) clutter spectrum of ionosphere

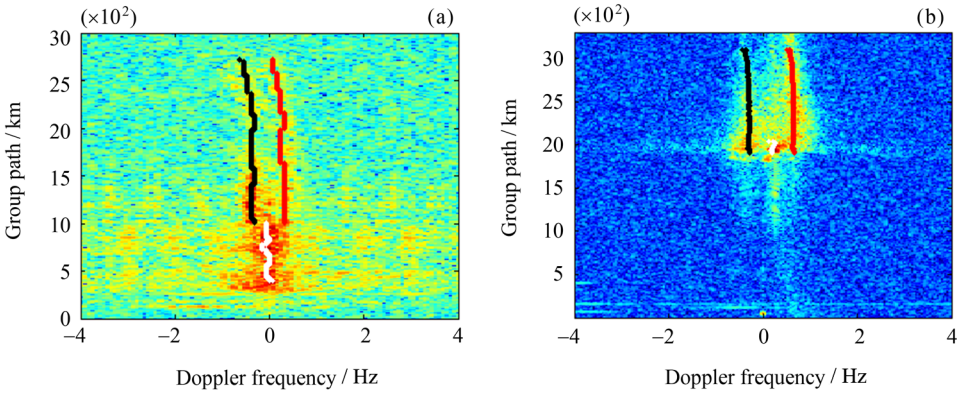


图 3 电离层 F 层一跳 (a) 和两跳 (b) 杂波信号提取结果 (红色和黑色实线为海杂波、白色实线为地杂波)

Fig. 3 Extraction results of F layer first-hop (a) second-hop (b) clutter signal of ionosphere (Red and black solid lines represent sea clutter, white solid lines represent ground clutter)

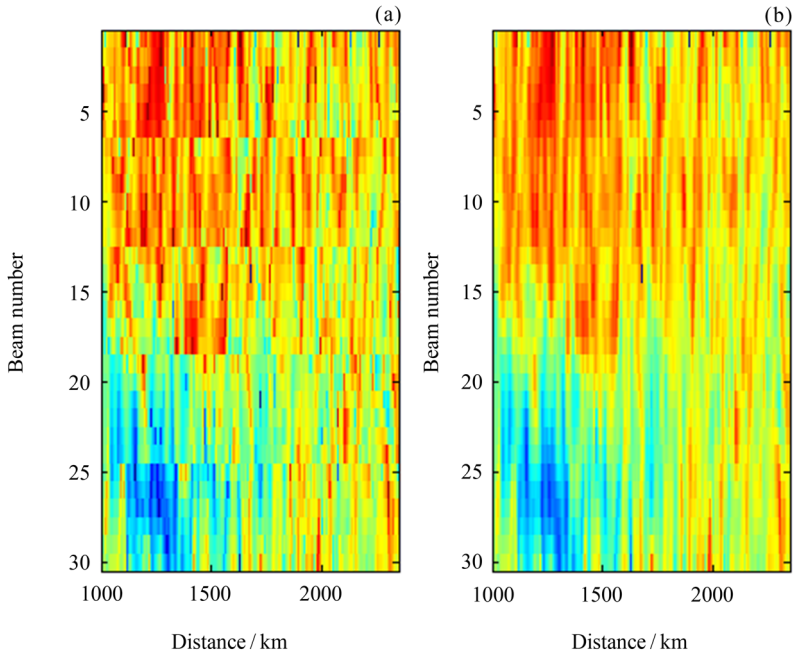


图 4 一阶海杂波峰值比分布. (a) 直接提取结果, (b) 平滑后结果

Fig. 4 Distribution of the first-order Bragg line ratio R. (a) Immediately extration, (b) smooth result

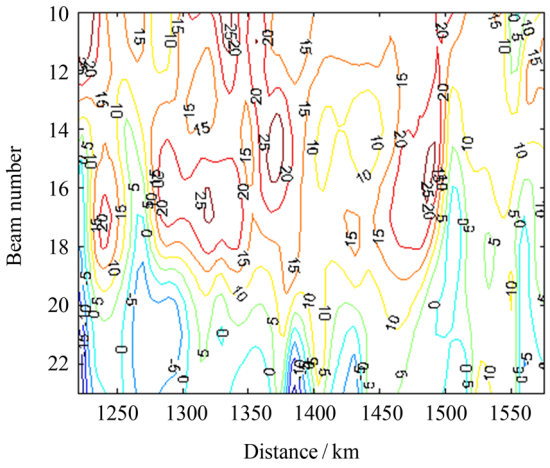


图 5 一阶海杂波峰值比等值线

Fig. 5 Contours of the first-order Bragg line ratio R

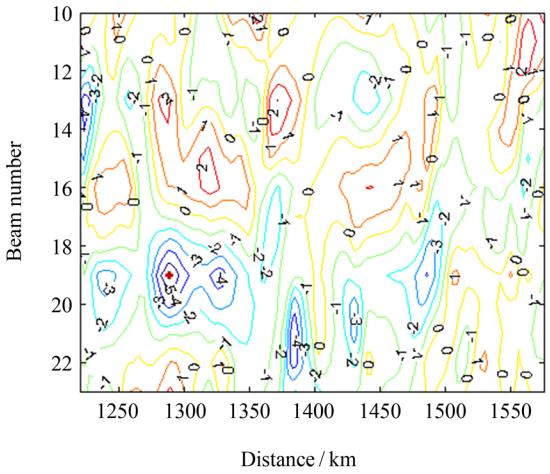


图 6 一阶海杂波峰值比修正差分值的等值线

Fig. 6 Contours of corrected difference of the first-order Bragg line ratio R

分和台风罗莎期间 2007 年 10 月 6 日 9 时 6 分的试验数据, 反演台风中心附近最大风速和风速分布, 结果如图 8 所示. 图 9 为图 8 台风中心风速分布的放大显示结果. 由图 9 明显可见, 反演结果符合台风中心风速较低的分布特性. 该邻近时刻气象部门发布的数据如下. 2009 年 8 月 7 日 10 时, 台风莫拉克中心气压为 96 kPa、最大风速为 40 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$、风力为 13 级、7 级半径为 450 km、10 级半径为 100 km. 2007 年 10 月 6 日 9 时, 台风罗莎中心气压为 93 kPa、最大风速为 55 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$、风力为 16 级、7 级半径为 550 km、10 级半径为 200 km. 由上述论述可知, 反演的最大风速与发布数据接近, 反演台风中心附近风速分布与发布数据在趋势上基本一致.

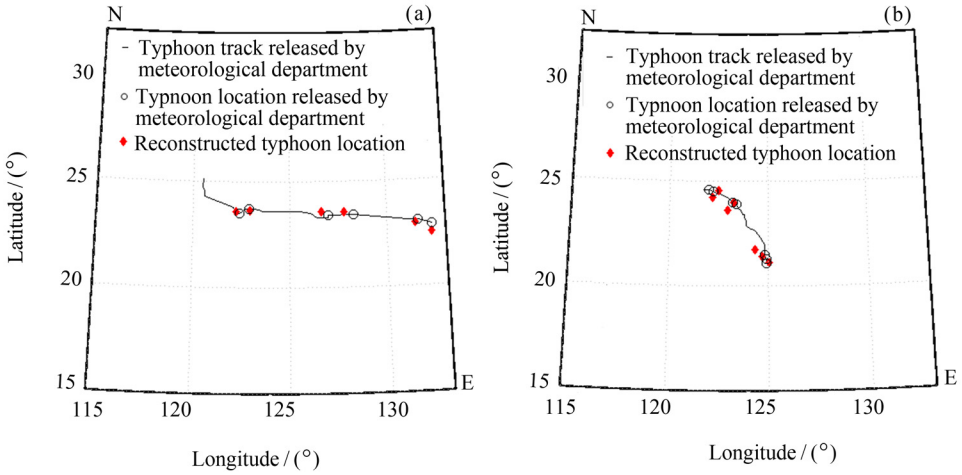


图 7 台风莫拉克 (a) 和罗莎 (b) 中心位置反演结果与气象部门公布数据对比

Fig. 7 Comparison of the reconstructed typhoon Morakot (a) and Rosa (b) center location and the data released by meteorological department

表 1 莫拉克台风中心反演结果与气象部门公布数据对比

Table 1 Comparing of the reconstructed typhoon Morakot center location and the data released by meteorological department

时间 (LT)	气象部门数据 (纬度, 经度)/(°)	时间 (LT)	反演数据 (纬度, 经度)/(°)
2009-08-05 14:00	22.9 N, 132.3 E	2009-08-05 15:07	22.5 N, 132.3 E
2009-08-05 17:00	23.1 N, 131.6 E	2009-08-05 16:07	23.0 N, 131.4 E
2009-08-06 08:00	23.4 N, 128.3 E	2009-08-06 08:52	23.6 N, 127.8 E
2009-08-06 12:00	23.4 N, 127.0 E	2009-08-06 12:22	23.6 N, 126.6 E
2009-08-07 10:00	23.7 N, 122.9 E	2009-08-07 09:37	23.6 N, 122.9 E
2009-08-07 12:00	23.5 N, 122.4 E	2009-08-07 12:07	23.6 N, 122.2 E

表 2 罗莎台风中心反演结果与气象部门公布数据对比

Table 2 Comparing of the reconstructed typhoon Rosa center location and the data released by meteorological department

时间 (LT)	气象部门数据 (纬度, 经度)/(°)	时间 (LT)	反演数据 (纬度, 经度)/(°)
2007-10-05 16:00	21.3 N, 124.9 E	2007-10-05 16:06	21.7 N, 124.3 E
2007-10-05 17:00	21.4 N, 124.8 E	2007-10-05 16:21	21.4 N, 124.7 E
2007-10-05 18:00	21.5 N, 124.8 E	2007-10-05 16:21	21.1 N, 125.0 E
2007-10-06 09:00	23.9 N, 123.4 E	2007-10-06 09:06	23.6 N, 122.9 E
2007-10-06 10:00	24.0 N, 123.2 E	2007-10-06 09:36	24.0 N, 123.3 E
2007-10-06 14:00	24.5 N, 122.2 E	2007-10-06 14:06	24.6 N, 122.5 E
2007-10-06 15:00	24.6 N, 122.0 E	2007-10-06 14:51	24.2 N, 122.2 E

4 结论

利用高频天波返回散射试验数据, 基于地 (海) 杂波频谱分布特性, 构建三谱滤波器模型, 实现了多类型频谱中一阶海杂波峰值比的较准确提取; 在台风中心位置与区域一阶海杂波峰值比相关性分析的基础上, 将后向差分法应用于台风中心识别, 实现了台风中心的有效确定; 采用修正经验模型法初步开展了

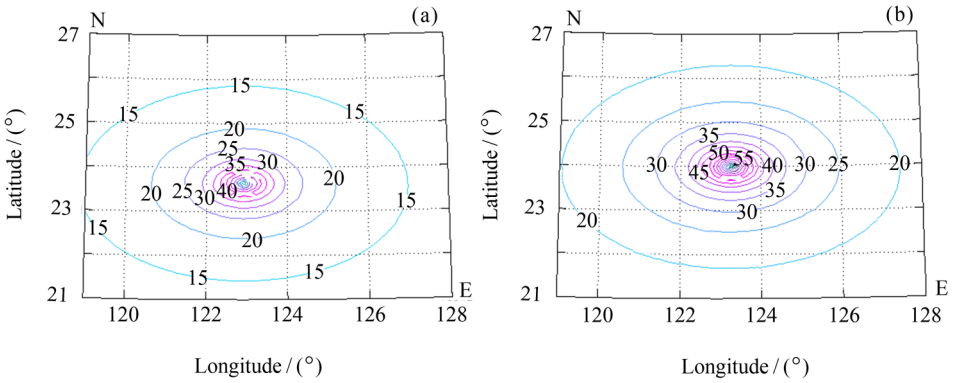


图 8 台风莫拉克 (a) 和罗莎 (b) 中心附近风速分布

Fig. 8 Wind velocity distribution near typhoon Morakot (a) and Rosa (b) center

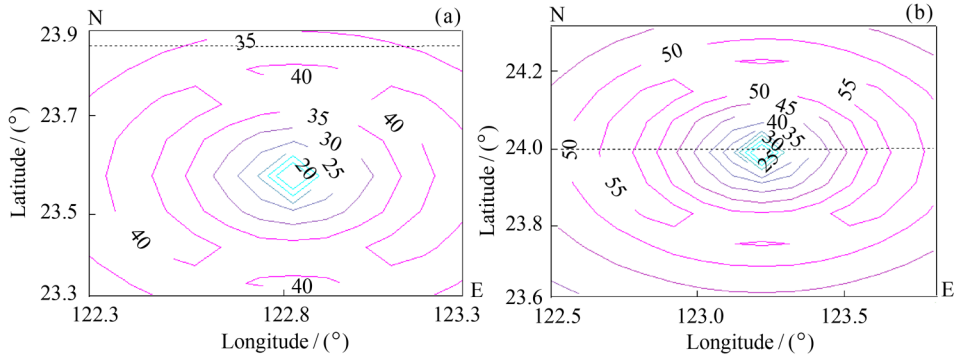


图 9 台风莫拉克 (a) 和罗莎 (b) 中心附近风速分布放大显示

Fig. 9 Zoom display of wind velocity distribution near the center of typhoon Morakot (a) and Rosa (b)

台风中心最大风速和台风中心附近风速的反演, 结果与气象部门发布数据基本一致.

高频天波返回散射海态反演精确度在一定程度上受限于电离层状态的稳定性. 另外, 地 (海) 面散射、干扰、噪声等复杂因素也使杂波谱准确析取困难, 提取信息不能有效展示杂波谱的时空特征. 下一步的工作主要包括两方面: 一是杂波谱干扰和噪声抑制、解电离层污染等, 试图通过信号处理、数据处理、高分辨谱分析等手段提高杂波谱质量; 二是通过大量试验数据验证和优化台风中心及风速反演算法, 提高算法的普适性, 从而为实现大范围实时海态检测提供技术支撑.

参考文献

[1] ZHOU Wenyu, JIAO Peinan. Over-the-Horizon Radar Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008 (周文瑜, 焦培南. 超视距雷达技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008)

[2] CROMBIE D D. Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc·s^{-1} [J]. *Nature*, 1955, **175**(4459): 681-682

[3] BARRICK D E. First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea [J]. *IEEE Trans. Ant. Propag.*, 1972, **20**(1): 2-10

[4] STEWART R H, BARNUM J R. Radio measurements of oceanic winds at long ranges: an evaluation [J]. *Radio Sci.*, 1975, **10**(10): 853-857

[5] LIPA B J, BARRICK D E. Extraction of sea state from HF radar sea echo: mathematical theory and modeling [J]. *Radio Sci.*, 1986, **21**(1): 81-100

[6] LIPA B. Inversion of second-order radar echoes from the sea [J]. *J. Geophys. Res.*, 1978, **83**(C2): 959-962

[7] AHEARN J L, CURLEY S R, HEADRICK J M, *et al.* Tests of remote sky wave measurement of ocean surface conditions [J]. *Proc. IEEE*, 1974, **62**(6): 681-687

[8] BARNUM J R, MARESCA J W JR, SEREBRENY S M. High-resolution mapping of oceanic wind fields with sky-wave radar [J]. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 1977, **2**(1): 128-132

[9] ANDERSON S J. Remote sensing with the JINDALEE

skywave radar [J]. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 1986, **11**(2): 158-163

[10] JARROTT R K, NETHERWAY D J, ANDERSON S J. Signal processing for ocean surveillance by HF skywave radar [C]//Proceedings of the Australian Symposium on Signal Processing and Applications. Adelaide, Australia, 1989: 293-297

[11] GEORGES T M, THOME G D. An opportunity for long-distance oceanographic and meteorological monitoring using Over-the-Horizon defense radars [J]. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 1990, **71**(12): 1739-1745

[12] LONG A E, TRIZNA D B. Mapping of north Atlantic winds by HF radar sea backscatter interpretation [J]. *IEEE Trans. Ant. Propag.*, 1973, **21**(5): 680-685

[13] ANDERSON S J. HF skywave radar measurements of cyclone generated ocean waves [C]//Proceedings of Radarcon-90. Adelaide, Australia, 1990: 351-323

[14] HOWELL R, WALSH J. Measurement of ocean wave spectra using narrow-beam HF radar [J]. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 1993, **18**(3): 296-305

[15] GEORGES T M, HARLAN J A, LEBEN R R, *et al.* A test of ocean surface-current mapping with Over-the-Horizon radar [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1998, **36**(1): 101-110

[16] MARESCA J W, BARNUM J R. Remote measurement of the position and surface circulation of hurricane Eloise by HF skywave radar [J]. *Mon.Wea. Rev.*, 1979, **107**(12): 1648-1652

[17] MARESCA J W JR, CARLSON C T. High-frequency skywave radar track of tropical storm debra [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**(4): 871-877

[18] GEORGES T M, HARLAN J A, MEYER L R, *et al.* Tracking hurricane Claudette with the U.S. air force Over-the-Horizon radar [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1993, **10**(4): 441-451

[19] JIAO Peinan, ZHANG Xiuju. Measurements of the HF backscatter echo spectra [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1985, **5**(3): 191-198 (焦培南, 张秀菊. 高频返回散射回波频谱测量 [J]. 空间科学学报, 1985, **5**(3): 191-198)

[20] JIAO Peinan. Remote sensing of sea state by short-wave radar [J]. *Remote Sens. Inf.*, 1986(3): 9-11 (焦培南. 短波雷达遥感海洋状态 [J]. 遥感信息, 1986(3): 9-11)

[21] FAN Junmei, JIAO Peinan, XIAO Jingming. A multi-function numerical simulation software of sea echo spectrum for the HF radar [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 1997, **12**(4): 443-447 (凡俊梅, 焦培南, 肖景明. 多功能 HF 雷达海洋回波谱模拟软件 [J]. 电波科学学报, 1997, **12**(4): 443-447)

[22] JIAO Peinan, FAN Junmei. Remote sensing of ocean state with HF skywave Over-the-Horizon radar [C]//National Symposium on Marine High and New Technology Development Strategy, 1998: 215-220. (焦培南, 凡俊梅. 高频天波超视距雷达遥感远距大面积海洋状态 [C]//全国海洋高新技术发展战略研讨会文集, 1998: 215-220)

[23] JIAO Peinan, FAN Junmei, WU Haipeng, *et al.* The experimental research of the Doppler spectrum by HF skywave backscattering [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2004, **19**(6): 643-648 (焦培南, 凡俊梅, 吴海鹏, 等. 高频天波返回散射回波谱实验研究 [J]. 电波科学学报, 2004, **19**(6): 643-648)

[24] JIAO Peinan, LI Jining, FAN Junmei. The experimental research of tracking the hurricane with HF backscattering [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2009, **24**(2): 199-205 (焦培南, 李吉宁, 凡俊梅. 高频返回散射台风跟踪技术实验研究 [J]. 电波科学学报, 2009, **24**(2): 199-205)

[25] HUANG Weimin, WEN Biyang, WU Shicai, *et al.* A new algorithm for extracting unambiguous wind directions by monostatic HF radar [J]. *J. Wuhan Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2001, **47**(5): 645-648 (黄为民, 文必洋, 吴世才, 等. 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)

[26] ROSS D B. A simplified model for forecasting hurricane generated waves (abstract) [C]. Bull. Am. Meteor. Soc., Presented at Conference on Atmospheric and Oceanic Waves, Seattle, Washington, March 29—April 2, 1976, American Meteorological Society

[27] ROSS D B, CARDONE V J. A comparison of parametric and spectral hurricane wave prediction products [C]//NATO Symposium on Turbulent Fluxes Through the Sea Surface, Wave Dynamics and Prediction, Marseille. New York: Plenum Publishing Company, 1978

[28] CARDONE V J, ROSS D B, AHRENS M R. An experiment in forecasting hurricane generated sea states [C]//Proceedings of the 11th Technical Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. Miami, Florida, 1977

[29] BARRICK D E. The Ocean waveheight nondirectional spectrum from inversion of the HF sea-echo Doppler spectrum [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1977, **6**(3): 201-227

[30] MACAFEE A W, PEARSON G M. Development and testing of tropical cyclone parametric wind models tailored for midlatitude application–preliminary results [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 2006, **45**(9): 1244-1260