

新一代天气雷达海浪回波特征分析和识别方法研究*

谭学^{1,2} 刘黎平² 范思睿³

TAN Xue^{1,2} LIU Liping² FAN Sirui³

1. 成都信息工程学院, 四川 成都 610225

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3. 四川省人工影响天气办公室, 四川 成都 610072

1. *Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China*

2. *State Key Lab of Severe Weather Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

3. *Weather Modification Office of Sichuan Province, Chengdu 610072, China*

2012-07-09 收稿, 2013-05-22 改回.

谭学, 刘黎平, 范思睿. 2013. 新一代天气雷达海浪回波特征分析和识别方法研究. 气象学报. 71 (待刊)

Tan Xue, Liu Liping, Fan Sirui. 2013. Statistical Characteristics of Sea Clutter and Identification of Sea Clutter with CINRAD. *Acta Meteorologica Sinica*. 71(in press) (in Chinese)

Abstract Radar echo from sea clutter is an unpredictable event which often contaminates the precipitation measurement and other radar products in coastal areas. According to sea clutter observed by SA Doppler radars in Fuzhou, Wenzhou, it is divided into two kinds by the time when it appears. The first kind of sea clutter with strong strength mainly appears before and after a precipitation process during the period except typhoon. The second kind of sea clutter whose strength is generally weak and uniform only appears close to sea areas of the radar position during a typhoon. The reflectivity, radial velocity, spectrum width of velocity, and their spatial variations for sea clutter and different precipitation are examined to determine the membership functions based sea clutter detection algorithm. For the first kind of sea clutter, considering rarely overlap between sea clutter and precipitation echo, the algorithm is based on fuzzy logic and echo pieces using SCIT. Firstly, the pre-processing criteria which can be used to determine when sea clutter is likely to take place so that sea clutter detection algorithm can be applied. Secondly, echoes are combined into pieces using SCIT, if the area of an echo piece is more than 500km^2 , the echo piece would be given a attribute value. The echoes would be calculated with an algorithm based on fuzzy logical if the attribute value of echo piece meets suitable conditions and the area of echo piece is less than 500km^2 .

* 资助课题: 中国气象局重点工程项目“新一代天气雷达建设业务软件系统开发项目”、气象行业专项“多部雷达组网适应性观测技术与数据质量控制”(GYHY201106046)和中国气象科学研究院基本科研业务费专项项目“大气水凝物微物理参数及风场垂直结构多波长遥感探测和反演方法研究”和“青藏高原观测预试验与资料分析研究”。

作者简介: 谭学, 研究生, 主要从事雷达气象研究。Email:tanxue000@yahoo.com.cn

Inspired by LIU' s two-step ground clutter detection algorithm, the author improved Liu' s approach to realize the dynamic threshold. For the second kind of sea clutter, the algorithm is based on fuzzy logic and the improved two-step approach. The analyses results show that most of sea clutters are detected effectively by the two kinds of identification method. The method of echo pieces using SCIT and the improved two-step approach has obvious reduced the possibility of the precipitation misidentified as sea clutters.

Key words Sea clutter, Fuzzy logic, Echo identification, Quality control

摘 要 海浪回波是影响沿海雷达定量估测降水和其它产品的重要因素, 本文根据福州、温州的SA多普勒雷达收集海浪回波资料, 按出现时间关系将其分为两类。第一类海浪回波强度一般较强, 主要在台风期间外的其余时间, 降水过程前后出现; 第二类海浪回波强度较弱且均匀, 仅在台风期间, 雷达位置的近海域出现。本文通过分析资料得到两类海浪回波不同于对应降水回波的各种特征, 确定识别海浪回波的最佳隶属函数。针对第一类海浪回波, 考虑到海浪回波很少与降水回波混合, 本文采用了基于回波分块和模糊逻辑的海浪回波识别方法; 首先利用算法预处理条件判断是否执行算法识别, 然后采用SCIT算法将回波组合成块, 计算每个独立回波块的属性值, 对符合要求的回波块和离散回波点再进行基于模糊逻辑的逐点识别, 并借鉴了刘黎平等提出的分布式回波识别方法并加以改进来实现回波点的动态阈值识别。针对第二类海浪回波, 直接采用了基于模糊逻辑的分布式海浪回波识别方法。通过识别效果分析表明: 两种识别方法能分别对应识别出大部分海浪回波, 回波分块和分布式方法对海浪回波的识别效果有明显的改善, 有效地降低了降水回波被误判为海浪回波的概率。

关键词 海浪回波, 模糊逻辑识别, 回波识别, 质量控制

中图法分类号 P412

1 引 言

在沿海地区, 雷达经常会探测到海浪回波, 这种回波属于非气象回波, 主要是由超折射现象所引起, 而非气象回波会干扰降水回波, 影响降水产品的准确性, 导致临近预报出现偏差, 因此要在降水估计之前将其识别并剔除。一些专家提出了自动处理雷达基数据的方法, 如早期的海浪回波识别主要依靠回波的垂直变化 (Fulton, et al, 1998), Alberoni 等 (2001) 利用区域非断裂廓线的出现频率剔除超折射海浪回波, Steiner 等 (2002) 利用决策树方法研究一系列反射率参数, 认为雷达回波的垂直伸展、反射率因子场的水平变化和反射率的垂直梯度最有用。

Kessinger 等 (2002, 2003) 在 Steiner 的技术基础上, 提出了采用模糊逻辑算法的雷达分类技术。综合使用回波强度、径向速度和速度谱宽识别地物、海浪回波模糊逻辑方法已应用于 WSR-88D 天气雷达 ORPG (Open Radar Product Generator) 系统中。Zhang 等 (2004) 提出在计算反射率垂直梯度时, 将 Steiner 算法中的仰角改为高度, 实际高度的使用显著减小了波速随距离的展宽影响。Berenguer 等 (2005, 2006) 通过分析受超折射回波影响区域, 将其作为参数加入模糊逻辑算法中识别海浪回波。Lakshmanan 等 (2003) 研究提出了基于神经网络(neural network)的雷达质量控制技术。随着双线偏振雷达不断发展, 在模糊逻辑方法中加入双线偏振参量, 能较好

地识别地物、超折射等非气象回波 (Ryzhkov, et al, 2002; Gourley, et al, 2007)。一些专家综合利用卫星和雷达资料进行地物、海浪和晴空回波的识别和剔除 (Lakshmanan, et al, 2004; Michelson, et al, 2004; Bøvith, et al, 2006)。

中国建成的雷达系统已逐步投入业务运行, 并在此基础上开展了灾害性天气监测、风场反演、定量估测降水和临近预报等工作 (俞小鼎等, 2006; 张亚萍等, 2007)。所以对雷达基数据的质量控制是非常必要的。刘黎平等 (2007)、江源等 (2009) 进行了对多普勒天气雷达地物回波模糊识别方法的研究, 有效地识别了地物及超折射回波。但目前国内, 对基数据中海浪回波的识别及剔除还没有开展, 未经质量控制的雷达资料用于天气过程的定性分析和使用问题还不小, 有经验的预报员能凭借经验判别海浪回波, 但对于雷达资料的定量应用, 如雷达资料的同化、水文预报等, 海浪回波必须进行处理, 否则会出现严重误差。

本文首先对福州、温州 SA 雷达收集到的海浪回波进行分类, 分析了两类海浪回波特征, 给出了识别两类海浪回波的隶属函数。针对第一类海浪回波, 采用了基于回波分块和模糊逻辑的分布式海浪回波识别方法; 针对第二类海浪回波, 采用了基于模糊逻辑的分布式海浪回波识别方法。通过识别效果分析, 回波分块和分布式方法对海浪回波的识别有明显的改善。

2 个例选取及特征分析

本文所选数据为福州、温州 CINRAD/SA 雷达观测的基数据。利用人为方法对资料进行判断, 确定海浪、降水回波的“真值”。判断的依据是: 海浪回波出现在海面区域, 由许多针状的回波体组成, 呈扇形向外辐散, 回波高度比较低, 很少达到第二层仰角, 径向速度偏小, 主要集中在 10m/s 到 5m/s, 对应区域的卫星观测的 TBB (Black Body Temperature) 温度高于 273K; 对于降水回波, 可以从回波形状、垂直结构、演变和移动等方面加以判断。应该注意的是: 用人工方法严格区分海浪回波和降水回波有时也是非常困难的, 特别是对应晴空回波和远处的弱降水回波更是如此。

本文根据上述方法收集到 6992 个海浪回波体扫资料, 从出现时间关系可把它们分为两类:

(1) 第一类海浪回波

第一类海浪回波主要在台风期间以外的时间出现; 在 PPI 上, 由许多针状的回波体组成, 呈扇形向外辐散, 强度一般较强、不均匀性较明显, 回波顶高很低, 很少能到达第二仰角, 与降水回波很少混合, 第一类海浪回波的出现一般都伴随着超强地物回波存在。这类回波通常是由于超折射现象引起, 降水过程前后出现概率较大, 回波范围较大, 这种海浪回波相对比较常见 (图 1a)。

(2) 第二类海浪回波

第二类海浪回波仅在台风期间出现; 在 PPI 上, 也由许多针状的回波体组成, 呈扇形向外辐散, 但强度一般较弱且均匀, 回波顶高很低, 没有明显移动。这类回波主要在雷达位置的近海域出现 (图 1d)。

6992 个海浪回波体扫资料，包括福州 2009-2011 年连续 3 年收集到 3336 个第一类海浪回波体扫资料、2008-2010 年收集到 3238 个第二类海浪回波体扫资料，温州 2008-2010 年收集到 418 个第二类海浪回波体扫资料。通过分析这些数据发现：第一类海浪回波最早出现在三月中旬，并一直持续到十月下旬，春末夏初季节（5-6 月）出现概率最大，并且夜晚的出现概率明显大于白天；第二类海浪回波出现时间主要出现在 6-10 月，因其出现一般伴随台风，所以与台风的出现季节类似。

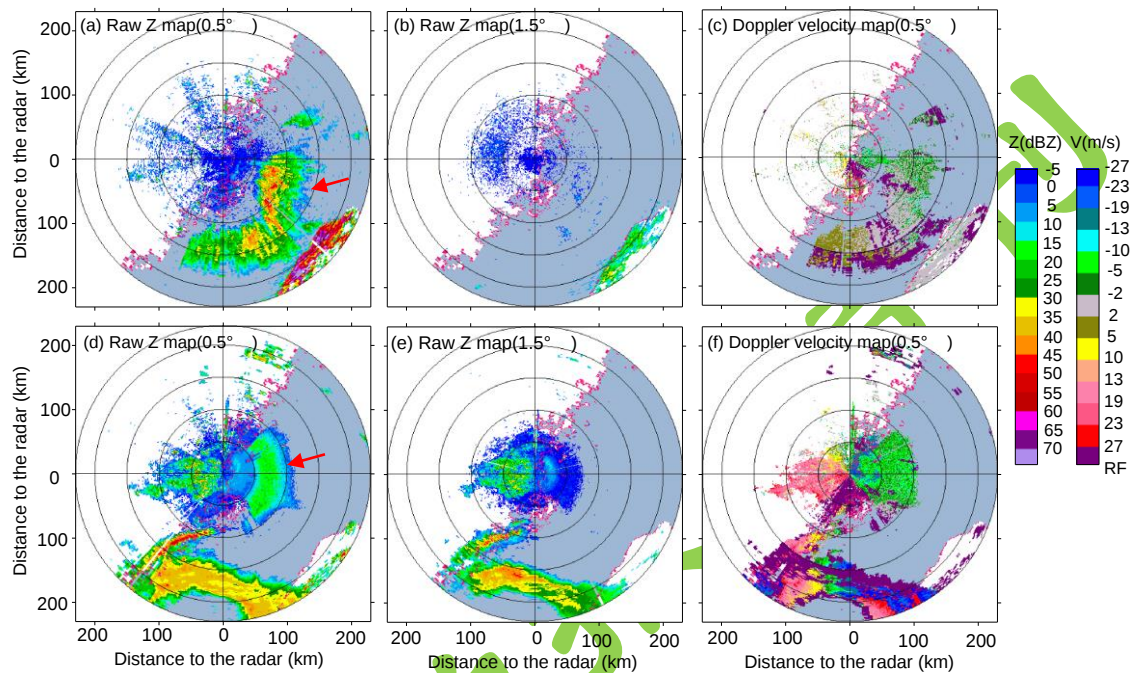


图 1 福州雷达 2009 年 5 月 6 日 20:21(UTC, 下同)观测到的第一类海浪回波 PPI 图

(a) 0.5° 仰角反射率因子, (b) 1.5° 仰角反射率因子, (c) 0.5° 仰径向速度因子

福州雷达 2010 年 9 月 19 日 17:20 台风凡亚比来临前观测到的第二类海浪回波 PPI 图

(d) 0.5° 仰角反射率因子, (e) 1.5° 仰角反射率因子, (f) 0.5° 仰径向速度因子

(红色箭头指向为超折射海浪回波, 距离圈: 50km, 淡蓝色为海面)

Fig.1 PPI of the first kind of sea clutter for Fuzhou radar scan measured at 2021 UTC 6 May 2009

(a)reflectivity at 0.5° elevation,(b)reflectivity at 1.5° elevation,(c)radial velocity at 0.5° elevation

PPI of the second kind of sea clutter for Fuzhou radar scan measured during typhoon Fanapi at 1720 UTC 19 Sep 2010

(d)reflectivity at 0.5° elevation,(e)reflectivity at 1.5° elevation,(f)radial velocity at 0.5° elevation

(red rows point to sea clutter, interval of range circles:50km,light blue shows the sea area)

2.1 海浪回波强度、速度阈值

由于两类海浪回波的回波顶高都较低，径向速度较小，通过收集到的海浪回波数据统计分析得到海浪回波的强度、速度阈值（如表 1）。其中 Z_1 , Z_2 为对应的第一层仰角（0.5° 仰角）和第二层仰角（1.5° 仰角）PPI 的回波强度， V 为对应的第一层仰角 PPI 的径向速度。对不同类型的降水回波，凡超过其阈值的回波可直接认定为降水回波。

表 1 海浪回波强度、速度阈值

Table 1 Condition of reflectivity of sea clutter in the second tilt

	强度阈值	速度阈值
第一类 海浪回波	1. $Z_1 < 30\text{dBZ}$, $Z_2 < 0\text{dBZ}$ 或无值; 2. $Z_1 \geq 30\text{dBZ}$, $Z_1 - Z_2 < 15\text{dBZ}$;	$-10\text{m/s} < V < 5\text{m/s}$
第二类 海浪回波	1. $R < 50\text{km}$, $Z_2 < 10\text{dBZ}$; 2. $50\text{km} \leq R < 100\text{km}$, $Z_2 < 5\text{dBZ}$; 3. $R > 100\text{km}$, $Z_2 < 0\text{dBZ}$;	$-15\text{m/s} < V < 5\text{m/s}$

3 海浪回波识别方法

针对第一类海浪回波，考虑到海浪回波和降水回波通常是成块出现，很少混合，其回波强度的局地变化、径向速度等也有明显差异。本文首先对回波进行分块，判断每个回波块的属性，确定一个判断阈值，对超过阈值的回波块直接认定为降水回波，然后对小于阈值的回波块和零散回波，利用模糊逻辑方法对每个格点回波进行判断，最后将每个格点回波识别为海浪回波或降水回波。针对第二类海浪回波，本文直接利用模糊逻辑方法进行逐点识别。

3.1 回波块识别方法

针对第一类海浪回波，将强度在 5dBZ 以上的回波利用 SCIT (Storm Cell Identification and Tracking) 算法组合成块。我们从收集到的降水回波和海浪回波样本中，选取面积在 100km^2 以上的回波块，共选取 2160 个降水回波块和 1536 个第一类海浪回波块，本文使用了降水回波频率 (F_{OBP}) 参量用于计算回波块属性值，该参量的定义如下：

$$F_{\text{OBP}} = \frac{A_p}{A_{\text{All_counts}}} \quad (1)$$

其中， A_p 表示在海面区域内的回波块中降水回波面积，其中降水回波的判定主要依赖于 2.1 节中海浪回波强度、径向速度阈值； $A_{\text{All_counts}}$ 表示海面区域内的回波块面积。 F_{OBP} 反映了回波块为降水回波的程度， F_{OBP} 越大，说明回波块为降水回波的可能性越大，海浪回波的可能性就越小。图 2 给出了该参量的概率分布。

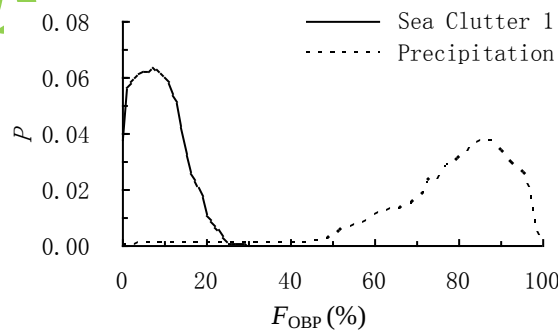


图 2 F_{OBP} 的概率分布

Fig.2 Probability distribution curves of F_{OBP}

从图 2 可知，降水回波的降水回波频率参数明显大于海浪回波的降水回波频率。其中降水回波的 F_{OBP} 值较大，绝大部分值主要集中在 50-100 的区域，而海浪回波的 F_{OBP} 明显较小，主要集中在 0-20 的区域。

3.2 基于模糊逻辑的逐点识别方法

模糊逻辑方法就是从雷达资料（回波强度、径向速度和速度谱宽）中提取用于区分不同雷达回波如降水回波、地物 and 海浪回波等的物理量，然后根据降水回波、地物和海浪回波的特征设置隶属函数，对这些物理量进行模糊化处理，得到所有物理量对于不同类型回波的 0-1 取值范围的判据，该判据越大，该回波点属于这种类型回波的可能性就越大。对这些判据进行加权累加，当某点的海浪回波的判据超过指定的阈值时，该点就被识别为海浪回波。

我们分析海浪回波和降水回波差异的 6 个物理量，包括从回波强度中提取的 5 个物理量：回波强度的纹理（ T_{DBZ} ）、垂直变化（ G_{DBZ} ）、沿径向的库间变化程度（ S_{PIN} ）、降水回波频率（ F_{OP} ）、时间变化（ TV_{DBZ} ）；从径向速度中提取的 1 个物理量：径向速度的区域平均值（ M_{DVE} ）。这些量的定义如下：

$$G_{DBZ} = W(R)(Z_{up} - Z_{low}) \quad (2)$$

$$T_{DBZ} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} (Z_{i,j} - Z_{i,j+1})^2}{N_A \times N_R} \quad (3)$$

$$S_{PIN} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} M_{S_{PIN}}}{N_A \times N_R} \quad (4)$$

$$M_{S_{PIN}} = \begin{cases} 1 & |Z_{i,j} - Z_{i,j-1}| > Z_{thresh} \\ 0 & |Z_{i,j} - Z_{i,j-1}| \leq Z_{thresh} \end{cases}$$

$$F_{OP} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} M_P}{N_A \times N_R} \quad (5)$$

$$TV_{DBZ} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} |Z_{0,i,j} - Z_{-1,i,j}|}{N_A \times N_R} \quad (6)$$

其中， N_A 、 N_R 表示在方位和距离方向定义的计算范围， Z_{ij} 为任意点的回波强度， T_{DBZ} 主要反映回波强度的局地变化大小，如果区域回波的越均匀， T_{DBZ} 值越小，反之越大； Z_{low} 、 Z_{up} 为对应的本层和上层 PPI 的回波强度， $W(R)$ 表示与距离有关的权重，当 Z_{low} 、 Z_{up} 同时存在时， G_{DBZ} 反映了回波强度的垂直变化； Z_{thresh} 为库间回波强度变化的阈值，这里取 3.5dBZ； S_{PIN} 反映了回波强度沿径向方向变化的一致性，如果径向回波越均匀， S_{PIN} 值越小，反之越大； F_{OP} 表示区域内，根据海浪回波强度、速度阈值判定为降水回波的面积占全部有效面积的比例，反映了回波点判定降水回波的程度， F_{OP} 越大，说明区域内，降水回波的可能性越大，海浪回波的可能性就越小； Z_0 表示当前时刻某点的强度值， Z_{-1} 表示该点前一时刻某点的强度值， TV_{DBZ} 反应了区域对应点差值的平均回波强度随时间变化的情况，如果前后时刻区域回波移动缓慢， TV_{DBZ} 值越小，反之回波有明显移动，则

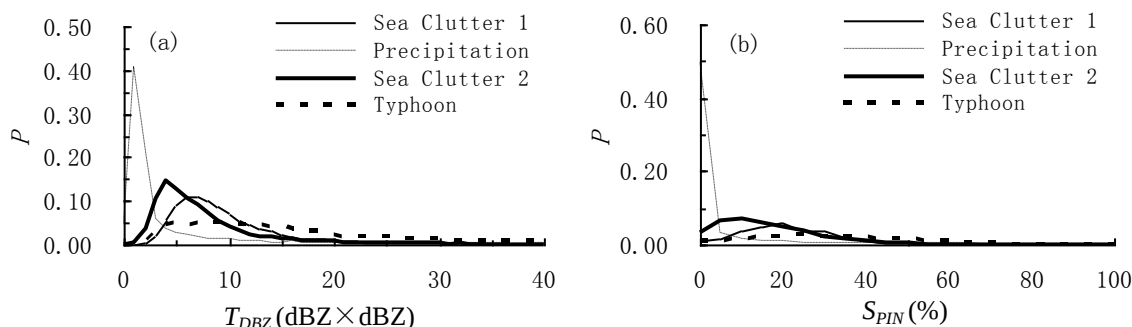
TV_{DBZ} 值越大。对于 T_{DBZ} 的计算范围: $N_A=9$, $N_R=9$; S_{PIN} 的计算范围: $N_A=7$, $N_R=7$; F_{OP} 的计算范围: $N_A=45$, $N_R=45$; TV_{DBZ} 的计算范围: $N_A=9$, $N_R=9$ 。

利用实际的雷达降水、海浪资料, 分析这些回波的上述物理量特征, 在此基础上确定隶属函数。

针对第一类海浪回波, 选用福州雷达 2009 年 5 月 6 日、2010 年 5 月 26 日, 厦门雷达 2009 年 5 月 14 日, 汕头雷达 2009 年 5 月 6 日, 温州雷达 2009 年 5 月 10 日, 舟山雷达 2009 年 5 月 29 日, 共有 1232851 个海浪回波点; 福州雷达 2011 年 6 月 28 日混合性降水过程、2010 年 5 月 7 日对流过程、2011 年 3 月 26 日层状云降水过程资料, 舟山雷达 2010 年 9 月 22 日对流过程资料, 烟台雷达 2009 年 5 月 22 日混合降水过程资料, 共有 3395344 个降水回波点, 分析降水回波和第一类海浪回波的特征差异。

针对第二类海浪回波, 选用福州雷达 2008 年 7 月 27 日(强台风“凤凰”期间)、2010 年 9 月 19 日(超强台风“凡亚比”期间), 舟山雷达 2011 年 8 月 5 日(强台风“梅花”期间), 汕头雷达 2010 年 10 月 19 日(超强台风“鲇鱼”期间)、2011 年 10 月 1 日(强台风“尼格”期间), 湛江雷达 2010 年 7 月 21 日(热带风暴“灿都”期间)的第二类海浪回波, 共有 2145683 海浪回波点; 福州雷达 2008 年 9 月 15 日、2010 年 9 月 19 日, 温州雷达 2008 年 7 月 28 日、2008 年 9 月 13 日, 湛江雷达 2010 年 7 月 21 日, 青岛雷达 2012 年 8 月 20 日台风降水回波资料, 共有 1852342 个降水回波点, 分析台风降水回波和第二类海浪回波的特征差异。

我们对符合上述强度阈值内的海浪回波和降水回波做统计分析, 以下给出了两类海浪回波、降水回波的 G_{DBZ} 、 T_{DBZ} 、 S_{PIN} 、 F_{OP} 、 TV_{DBZ} 和 M_{DVE} 的概率分布。从图中可以看到: 两类海浪回波的径向速度值都偏负, 速度较小; 第一类海浪回波的 T_{DBZ} 和 S_{PIN} 值明显大于降水回波, 垂直变化也明显大于降水回波, F_{OP} 在零值附近概率最大; 第二类海浪回波的 T_{DBZ} 和 S_{PIN} 值明显小于台风降水, TV_{DBZ} 值也明显小于台风降水。另外, 对不同类型的降水回波经过强度阈值滤除后统计分析, 超过阈值的回波直接认定为降水回波, 这样直接去除了特征较明显的回波(回波顶高较高), 如大部分对流云、混合降水, 所以统计分析出来的海浪回波与降水回波概率分布更具有可比性; 而台风降水回波的回波顶高较高, 经过强度阈值判定后, 剩余的主要是台风降水的外沿部分或距离较远的回波, 而强回波的外沿部分强度变化一般比较大, 距离较远的回波可以通过距离判定进行处理。



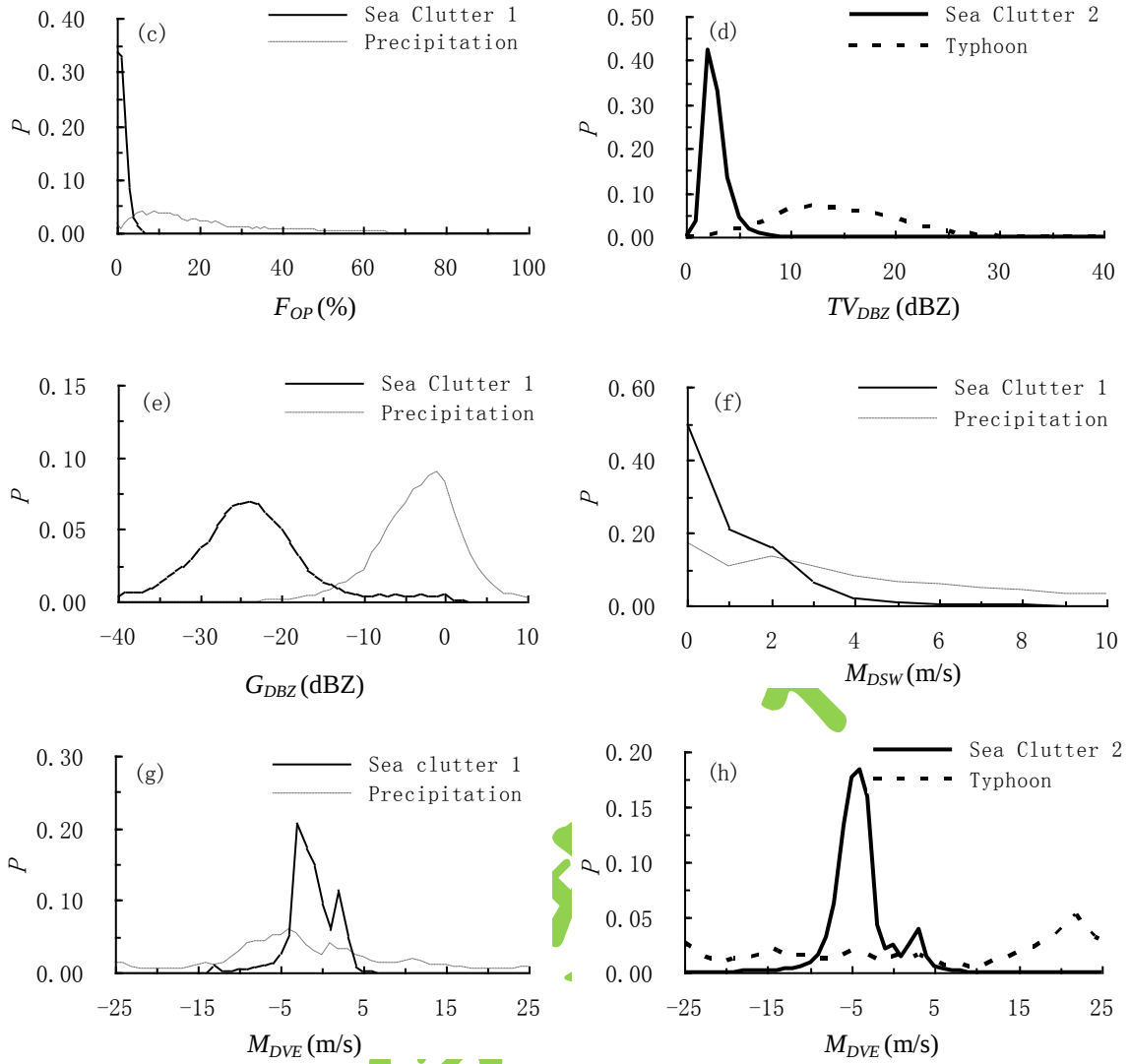
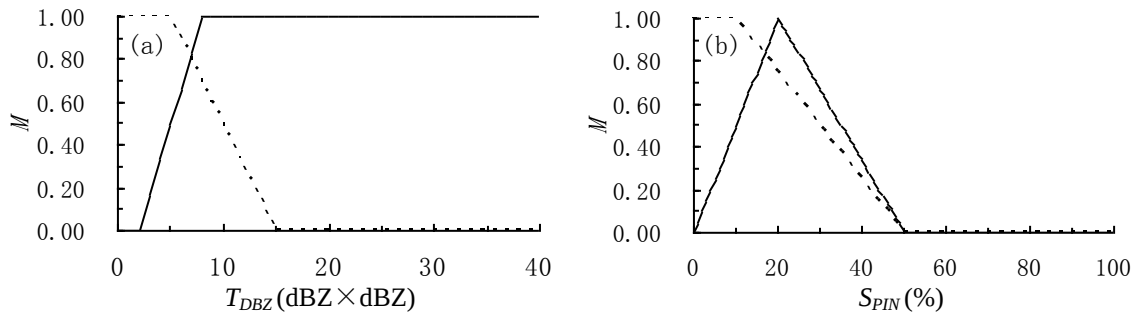


图3 海浪回波和降水回波的 T_{DBZ} 、 S_{PIN} 、 F_{OP} 、 TV_{DBZ} 、 G_{DBZ} 、 M_{DSW} 和 M_{DVE} 概率分布

Fig.3 Probability distribution curves of each characteristic parameter for sea clutter, precipitation

根据这些参量的概率分布，我们就可以确定用梯形折线表示的各个量的隶属函数（图

4）。



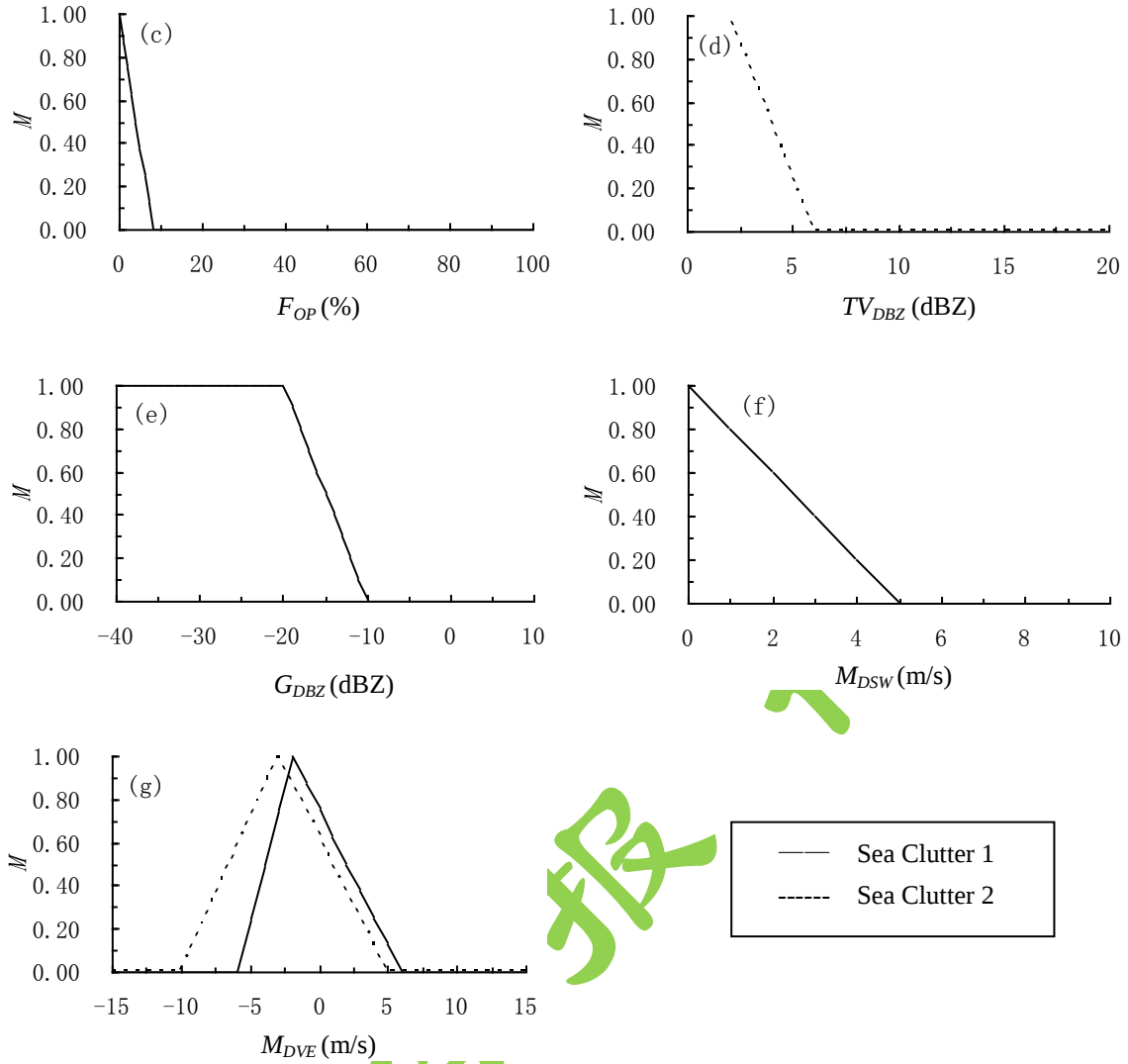


图4 海浪回波识别的 T_{DBZ} 、 S_{PIN} 、 F_{OP} 、 TV_{DBZ} 、 G_{DBZ} 、 M_{DSW} 和 M_{DVE} 隶属函数

Fig.4 Membership functions of T_{DBZ} 、 S_{PIN} 、 F_{OP} 、 TV_{DBZ} 、 G_{DBZ} 、 M_{DSW} and M_{DVE} for the first kind of sea clutter(solid line), the second kind of sea clutter (dashed line)

在实际计算这些参数过程中，针对 SA 雷达观测模式的特点，我们采用了如下计算方法：

(1) 识别海面区域

由于海浪回波只发生在海面上，为了避免对陆地上的误判，本文采用 90m×90m 分辨率数字地形高程模型 (DEM) 对雷达观测范围内的海面和陆地区域进行区分，并且所有算法只在海面区域进行识别。

(2) 资料的配对

由于 DEM 资料、 T_{BB} 资料、SA 雷达的回波强度和径向速度资料分辨率不同，为此我们将雷达的两层回波强度、径向速度资料、DEM 资料和 T_{BB} 资料进行经纬度处理，按照严格的经纬度排列这些资料，以满足同一回波点回波强度、径向速度资料、DEM 资料、 T_{BB} 资料的对应。

(3) 海浪回波识别算法预处理

a.只分析考虑海浪回波主要出现的季节，例如3月1日-10月31日。因此只对这个时间段的雷达基数据进行海浪回波识别。

b.由于第二类海浪回波出现与台风有关，所以第二类海浪回波识别算法只应用于台风期间，其余时间均进行第一类海浪回波识别。

(4) 海浪回波识别方法

1. 回波块识别方法

针对第一类海浪回波，面积为 100km^2 以上的回波块，如果 $F_{\text{OBP}} > F_{\text{LIM}}(0.3)$ ，则该回波块直接识别为是降水回波，然后对小于阈值的回波块和零散回波则进行逐点识别。

2. 基于模糊逻辑的逐点识别方法

为了滤掉噪声对径向速度参量计算的影响，我们用中值滤波的方法，处理径向速度资料，并用于计算径向速度值 (M_{DVE})。根据表 2，我们可以分别计算各个回波点的特征量，并根据相应的隶属函数，计算各自的判据，对每个点的判据进行累加平均，在这里我们对每个隶属函数均给予相应的权重（见表 2），这样就得到了每个点海浪的判别值（0-1），该值越大，是海浪回波的可能性就越大，反之，是降水回波或其它回波的可能性就越大。对于径向速度的距离模糊区，只计算回波强度物理量。

表 2 逐点识别算法所使用的特征量及其相应权重
Table 2 Weights assigned to the features implemented in the presented fuzzy logic technique

Feature	Weight	
	Sea 1	Sea 2
M_{DVE}	1	1
M_{DSW}	1	0
T_{DBZ}	1	1
S_{PIN}	1	1
G_{DBZ}	1	0
F_{OP}	1	0
TV_{DBZ}	0	1

(5) 分布式海浪回波判断步骤

第 1 步，设定 3 个阈值 T_1 、 T_5 、 T_2 ($T_1 < T_5 < T_2$)，其中 T_5 为标准的阈值（例如 0.5）， T_1 为第一步判断非海浪回波的阈值（例如 0.4）， T_2 为第一步判断为海浪回波的阈值（0.6）， T_1 和 T_2 用于第一步判断，判据大于 T_2 的为海浪回波，判据小于 T_1 的为非海浪回波，判据介于这两个阈值之间的在下一步判断。

第 2 步，设定计算范围 $N_A \times N_R$ ，对应每个判据介于这两个阈值之间的点，在影响距离库数范围内，计算已判断为海浪和非海浪回波的加权判据与 T_5 的差：

$$\Delta T = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} R_{i,j}^2 T_{i,j}}{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} R_{i,j}^2} - T_S \quad (8)$$

其中 N_A , N_R 表示在方位和距离方向定义的计算范围, 这里 $N_A=10, N_R$ 设为 10km, $T_{i,j}$ 为已判断为海浪或非海浪回波点的判据, $R_{i,j}$ 为已判断为海浪或非海浪回波点到判定点的距离。然后用 ΔT 和待判断点的判据之和与 T_S 比较来判断是否为海浪回波。

4 识别效果分析

4.1 统计分析

利用未统计部分的“真值”资料, 分析了各个参量对海浪回波识别效果的影响。特别是分析了分布式方法和回波分块方法在识别过程中起的作用。

我们以“真值”资料为目标, 分别对两类海浪回波和降水回波进行识别, 以准确率、误判率和漏判率来分析识别效果。即对海浪回波资料, 该方法正确地识别为海浪回波点数目占整个资料的比例为识别准确率, 没有识别出海浪回波的点的比例为漏判率, 降水回波识别为海浪回波为误判率。

首先分析阈值为 0.5 时各参量的识别准确率, 如表 3 所示, 其中 G_{DBZ} 参量只统计上下层都有强度的回波点。另外我们分析了分布式方法对两类海浪回波识别效果的影响。表 4、表 5 给出了采用固定阈值为 0.5 与分布式方法对两类海浪回波、降水回波识别的准确率和误判率。

另外, 针对第一类海浪回波, 我们分别统计了综合采用回波分块和基于模糊逻辑的逐点识别方法时, 降水回波的误判率和只采用模糊逻辑的逐点识别的误判率。对综合采用回波分块识别方法和只采用模糊逻辑的识别方法的降水回波误判率分别是 1.78% 和 6.45%, 可以看出利用回波分块的方法可以很好的改善对降水回波的误判。

表 3 各参量的识别准确率(单位: %)
Table 3 Identifiable accuracy of each characteristic parameter(unit:%)

隶属函数	M_{DSW}	M_{DVE}	T_{DBZ}	S_{PIN}	G_{DBZ}	F_{OP}	TV_{DBZ}
Sea 1	70.64	85.15	70.23	73.42	88.64	92.85	-
Sea 2	-	89.33	75.15	72.85	-	-	87.34

表 4 使用固定阈值对海浪、降水回波识别准确率和误判率(单位: %)

Table 4 Hit and miss rate of discrimination for sea clutter, precipitation using fixed value(unit:%)

隶属函数	海浪、降水 总样本识别 准确率	降水识别 误判率	台风降水 识别误判率
Sea 1	93.46	2.83	-
Sea 2	90.45	-	6.32

表 5 使用分布式方法对海浪、降水回波识别准确率和误判率(单位: %)

Table 5 Hit and miss rate of discrimination for sea clutter, precipitation using the two-step approach(unit:%)

隶属函数	海浪、降水 总样本识别 准确率	降水识别 误判率	台风降水 识别误判率
Sea 1	95.33	1.78	-
Sea 2	92.53	-	5.27

4.2 第一类海浪回波个例分析

分析 2009 年 5 月 14 日 07:03 福州雷达观测到的一次超折射海浪回波的识别效果（图 5）。从图 5a 可以看到，海面区域出现了大面积回波，将仰角抬高到 1.5° 后（图 5b），回波基本消失，从径向速度图（图 5d）上看，这些回波的径向速度很小；在东南方向 200km 左右的陆地（台湾地区）出现了强超折射地物回波，说明了海面区域有很强的逆温现象；并且从相同时间对应区域的卫星数据 FY-2C 红外亮温图（图 5c）可以看到该回波区域的 T_{BB} 值较高，即该区域处于无云或少云状态。说明海面上这些回波基本为超折射海浪回波。从图 5f 中可看出，采用该算法进行回波识别后，识别出了绝大部分超折射海浪回波，但仍然保留着一些弱海浪回波点，主要原因是该区域回波强度变化较小，没有径向速度观测资料。

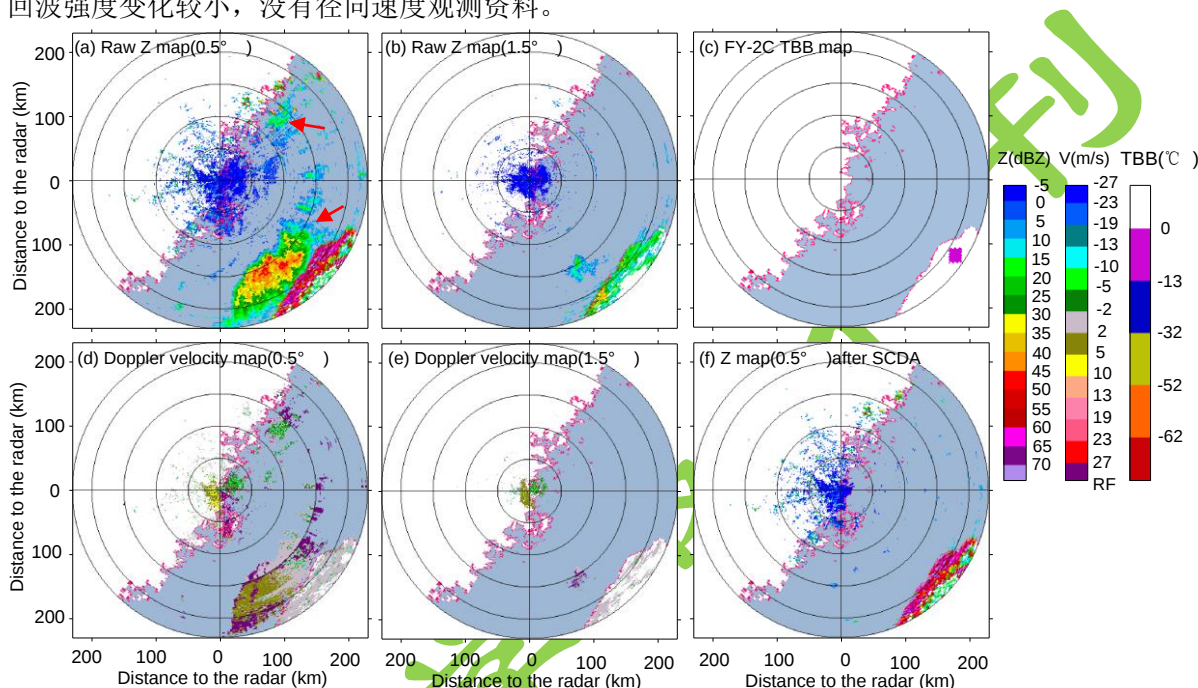


图 5 2009 年 5 月 14 日 07:03 (UTC) 福州雷达观测图 (红色箭头指向超折射海浪回波)

(a)回波识别前 0.5° 仰角反射率因子, (b)回波识别前 1.5° 仰角反射率因子, (c)FY-2C 的红外亮温 TBB 图, (d)回波识别前 0.5° 仰角径向速度, (e)回波识别前 1.5° 仰角径向速度, (f)SCDA 识别后的 0.5° 仰角反射率因子

Fig.5 Example of identification of sea clutter for Fuzhou radar scan measured on 0703 UTC 14 May 2009 (red rows point to sea clutter).

(a)reflectivity at 0.5° elevation before echo classify,(b)reflectivity at 1.5° elevation before echo classify, (c)FY-2C Satellite infrared temperature of black body,(d)radial velocity at 0.5° elevation before echo classify, (e)radial velocity at 1.5° elevation before echo classify,(f)reflectivity at 0.5° elevation after SCDA

为了更好地分析降水回波位置与第一类海浪回波变化的关系，下面我们分析 2010 年 5 月 30 日-6 月 1 日福州一次降水过程与海浪回波的演变及其识别结果。从这次过程分析，30 日 07:32，在雷达站东南方 150km 左右有混合降水回波，并向东南方逐渐离开雷达区域，同时在东北方向 200km 处开始出现海浪回波，10:35 降水回波全部离开雷达区域，海浪回波逐渐增多、增强，直至 31 日 21:31，西北方有小对流的出现，逐渐向东南方海面区域移动，随着降水回波的逐渐靠近，海浪回波逐渐较弱，1 日 10:08 对流云逐渐增强，并向正东方移动，逐渐覆盖海面区域，海浪回波开始逐渐减弱最后消失。

分析不同时刻的降水回波位置和海浪回波的变化，可以看出：随着降水回波逐渐离开雷达站，海浪回波开始出现，并逐渐的增多、增强；降水回波逐渐向海面区域移动，海浪回波逐渐减弱，并最后消失。

为了分析超折射海浪回波时的大气折射条件，利用 *NECP* 再分析资料对图 7 中红色三角形位置的大气折射模数 *N* 和大气修正折射模数 *M* 进行了计算。表 6 是 2010 年 6 月 1 日 06:00 温度、湿度、*N*、*M* 的计算结果，图 6 是根据上述计算结果绘制的温度、湿度、水汽压、*N* 和 *M* 的垂直廓线分布图。

表 6 2010 年 6 月 1 日 06:00 *NECP* 模式数据及计算结果
Table 6 The record and calculation result of *NECP* data at 06:00 on June 1, 2010

气压(hPa)	高度(m)	温度(K)	湿度(%)	水汽压(hPa)	<i>N</i>	<i>M</i>
1000	74	294.5	80	21.16	354.55	366.27
975	302	292.5	85	19.65	344.38	391.49
950	553	290.8	82	16.41	327.31	413.64
925	720	292.5	52	12.16	298.45	411.46
900	998	292.8	39	9.95	281.84	437.99
850	1485	290	44	9.53	265.31	500.75

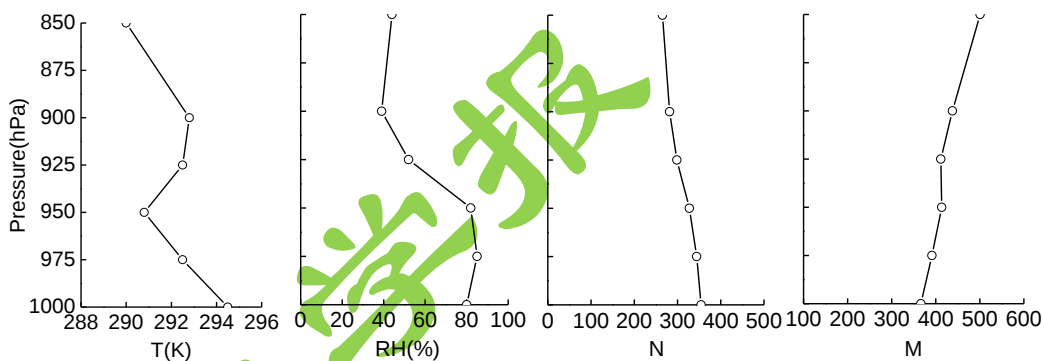


图 6 2010 年 6 月 1 日 06:00 的温度、湿度、*N* 和 *M* 的垂直廓线分布

Fig.6 The profile distributions of temperature, relative humidity, *N* and *M* at 06:00 on June 1, 2010

由图 6 可见，2010 年 6 月 1 日 06:00，从在 950-900hPa 之间出现逆温，湿度也随高度递减，大气修正折射模数 *M* 从 1000hPa 到 950hPa 随高度增加而增加，950hPa 到 925hPa 随高度减小，925hPa 以上随高度增加。因此。在 950hPa 到 925hPa 之间存在 $\frac{dM}{dh} < 0$ 情况，满足大气超折射现象的生成条件。

图 7 给出了福州 2010 年 6 月 1 日 04:32 回波强度和速度原始资料 and 海浪回波识别后的结果（0.5° 仰角）。在雷达站正南方 150-200km 有一片回波，从第二层回波强度与第一层回波强度的对比、径向速度场、对应的红外亮温及其回波区域的有大气波导现象来看，这些回波为海浪回波。图 8f 可以看出，这些回波基本被准确识别，应该注意的是：少量强度比较弱的海浪回波，未被识别为海浪回波，主要原因是该回波强度整体较弱，强度变化较小，而且没有径向速度观测资料。

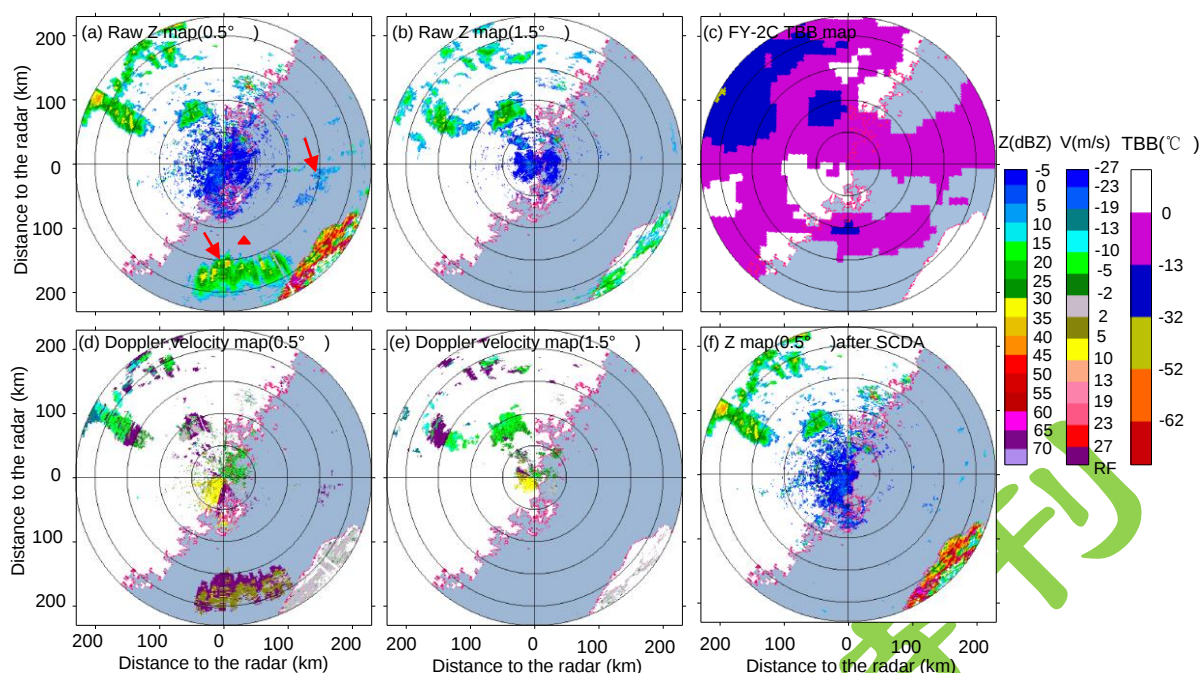


图7 2010年6月1日04:32(UTC)福州雷达观测图

(红色箭头指向超折射海浪回波, 实线圈为计算大气波导的位置)

(a)回波识别前 0.5° 仰角反射率因子, (b)回波识别前 1.5° 仰角反射率因子, (c)FY-2C 的红外亮温 TBB 图, (d)回波识别前 0.5° 仰角径向速度, (e)回波识别前 1.5° 仰角径向速度, (f)SCDA 识别后的 0.5° 仰角反射率因子

Fig.7 Example of identification of sea clutter for Fuzhou radar scan measured on 0432 UTC 1 Jun 2010

(red rows point to sea clutter, real line circle show the point where calculated M).

(a)reflectivity at 0.5° elevation before echo classify, (b)reflectivity at 1.5° elevation before echo classify, (c)FY-2C Satellite infrared temperature of black body, (d)radial velocity at 0.5° elevation before echo classify, (e)radial velocity at 1.5° elevation before echo classify, (f)reflectivity at 0.5° elevation after SCDA

4.3 第二类海浪回波个例分析

分析 2010 年 9 月 19 日 12:27 福州雷达观测超强台风凡亚比来临前的一次超折射海浪回波的识别效果(图 8)。在雷达站东边 0-100km 区域有一块扇形回波, 并且从第二层回波强度与第一层回波强度的对比、径向速度场、对应的红外亮温及其前一时刻的回波变化来看, 这些回波大部分为海浪回波, 该方法能将几乎全部海浪回波识别处理, 但由于雷达周围存在着一些弱非降水回波(如晴空回波)与海浪回波混合无法区分, 本方法一并将其识别并滤除。应该注意的是: 降水回波中少量的外沿部分被识别为海浪回波, 主要原因是该区域回波在海浪回波影响的区域范围内, 并且强度变化较小, 没有径向速度观测资料, 前后时刻回波变化不明显。

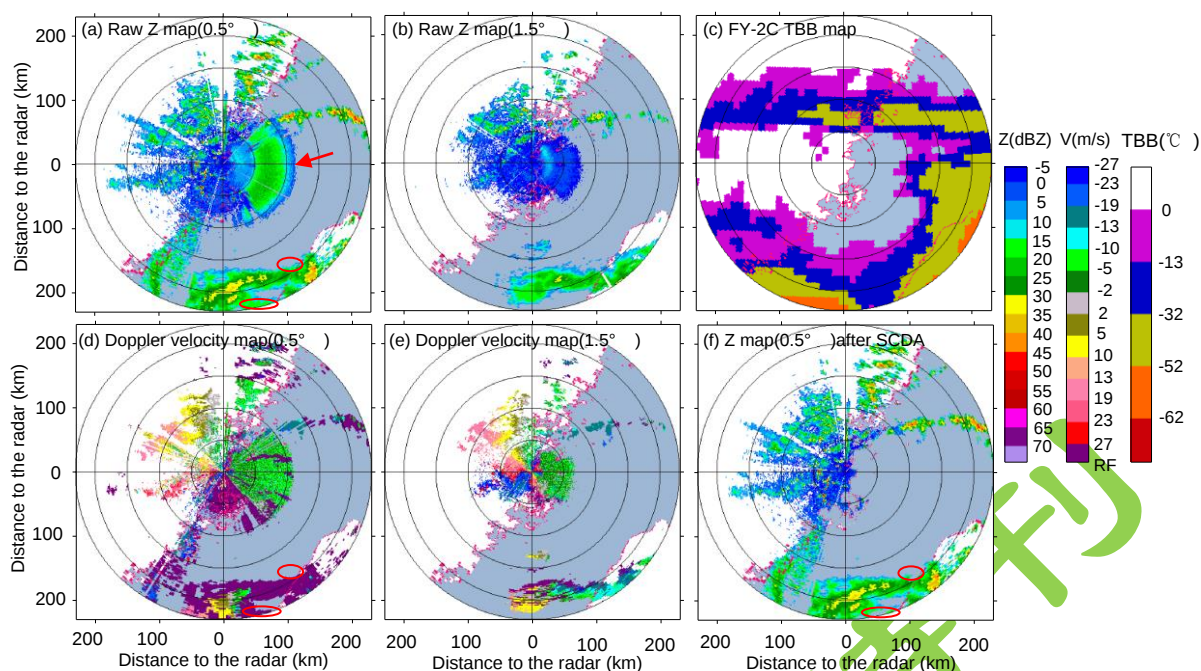


图8 2010年9月19日12:27(UTC)福州雷达观测图

(红色箭头指向超折射海浪回波, 实线圈为误识别回波)

(a)回波识别前 0.5° 仰角反射率因子, (b)回波识别前 1.5° 仰角反射率因子, (c)FY-2C 的红外亮温 TBB 图, (d)回波识别前 0.5° 仰角径向速度, (e)回波识别前 1.5° 仰角径向速度, (f)SCDA 识别后的 0.5° 仰角反射率因子

Fig.8 Example of identification of sea clutter for Fuzhou radar scan measured on 1227 UTC 19 Sep 2010

(red rows point to sea clutter, real line circle point to the wrong identification after echo classify).

(a)reflectivity at 0.5° elevation before echo classify,(b)reflectivity at 1.5° elevation before echo classify,

(c)FY-2C Satellite infrared temperature of black body,(d)radial velocity at 0.5° elevation before echo classify,

(e)radial velocity at 1.5° elevation before echo classify,(f)reflectivity at 0.5° elevation after SCDA

为了更好地分析台风降水与第二类海浪回波同时存在时该方面识别海浪回波的效果, 下面我们分析 2008 年 9 月 11-15 日福州一次与森拉克超强台风过程伴随的海浪回波的演变及其识别结果。从这次过程分析, 11 日 06:19, 在雷达位置的近海域开始出现了弱超折射海浪回波, 此时在福州雷达站东南方 400km 处出现台风周围的螺旋雨带, 并向雷达站点方向移动, 随着台风位置的不断接近, 海浪回波逐渐增强, 直到 15 日 11:32 随着台风的逐渐远去, 海浪回波开始逐渐变弱最后消失。

分析不同时刻的海浪回波变化, 可以明显看出: 随着台风逐渐靠近, 海浪回波强度越来越强; 台风逐渐远离, 海浪回波越来越弱并最后消失。图 9 给出了福州 2008 年 9 月 13 日 10:51 回波强度和速度原始资料 and 海浪回波识别后的结果 (0.5° 仰角)。从第一层径向速度和第二层回波强度 PPI 来看, 雷达近海域 100km 范围内大部分径向速度较小, 与降水回波速度有很大区别, 回波强度相对较弱且较均匀, 回波高度较低, 并且与前一时刻 2008 年 9 月 13 日 10:45 回波没有明显移动, 这些回波基本被准确识别。

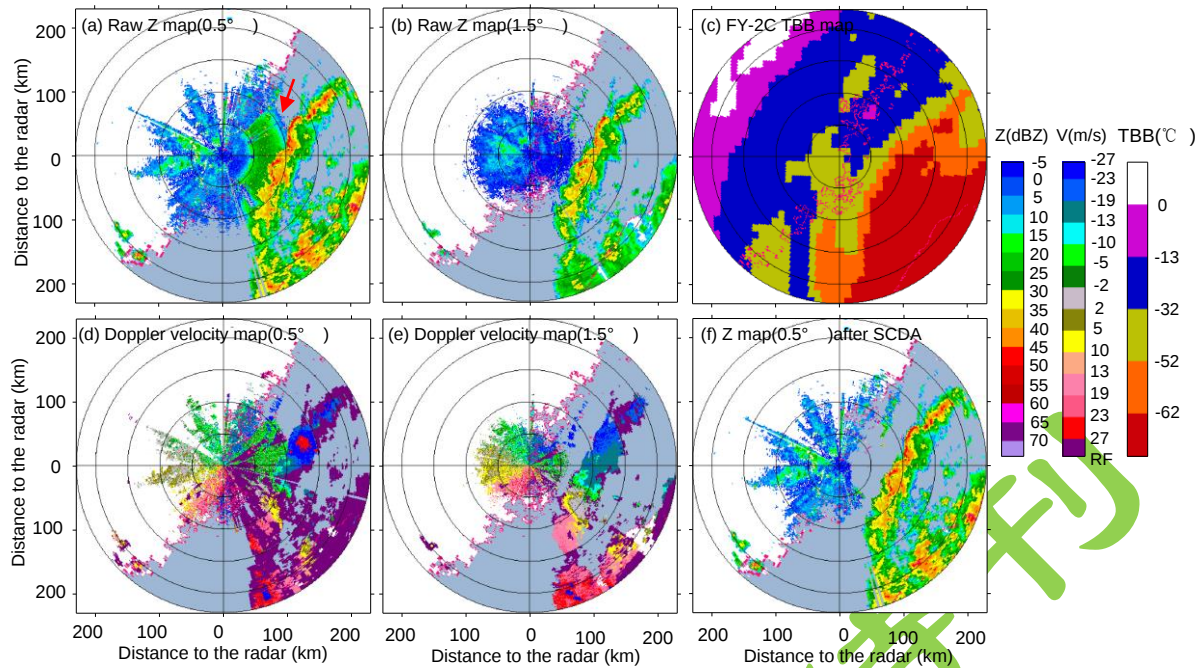


图9 2008年9月13日10:51(UTC)福州雷达观测图(红色箭头指向超折射海浪回波)

(a)回波识别前 0.5° 仰角反射率因子, (b)回波识别前 1.5° 仰角反射率因子, (c)FY-2C 的红外亮温 TBB 图, (d)回波识别前 0.5° 仰角径向速度, (e)回波识别前 1.5° 仰角径向速度, (f)SCDA 识别后的 0.5° 仰角反射率因子

Fig.9 Example of identification of sea clutter for Fuzhou radar scan measured on 1051 UTC 13 Sep 2008 (red rows point to sea clutter).

(a)reflectivity at 0.5° elevation before echo classify, (b)reflectivity at 1.5° elevation before echo classify, (c)FY-2C Satellite infrared temperature of black body, (d)radial velocity at 0.5° elevation before echo classify, (e)radial velocity at 1.5° elevation before echo classify, (f)reflectivity at 0.5° elevation after SCDA

4 结 论

本文根据中国 SA 福州雷达观测的降水和海浪回波强度、径向速度资料, 分析了两类海浪回波的特征, 针对第一类海浪回波, 采用了基于回波块和模糊逻辑的海浪回波识别方法; 针对第二类海浪回波, 直接采用了基于模糊逻辑的分布式海浪回波识别方法。并利用实际观测的雷达资料进行了两类海浪回波和降水回波的识别试验, 结果表明:

(1) 第一类海浪回波和降水回波的 T_{DBZ} 、 S_{PIN} 、 G_{DBZ} 、 F_{OP} 、 M_{DVE} 和 M_{DSW} 这 6 个参量取值范围有明显区别, 用这 6 个参量能够反演第一类海浪回波和降水回波特征并加以识别; 第二类海浪回波和台风降水回波的 T_{DBZ} 、 S_{PIN} 、 TV_{DBZ} 和 M_{DVE} 这 4 个参量取值范围有明显区别, 用这 4 个参量能够反演第二类海浪回波和台风降水回波特征并加以识别。

(2) 两种方法均能够分别有效识别两类海浪回波和对应的降水回波, 在识别第一类海浪回波中, 对于一般强度的海浪回波, 本方法识别效果较好, 可以识别出绝大部分回波; 对于强度较弱 (小于 10dBZ) 的第一类海浪回波, 识别效果不是很好, 有少量的剩余; 在识别第二类海浪回波中, 海浪回波的识别效果较好, 可以识别出绝大部分回波, 并且海浪回波的误判率和漏判率较小。

(3) 利用回波块的识别方法明显减少了对降水回波的误判; 而利用分布式方法能进一步改善海浪回波的识别效果, 特别是减少了没有径向速度资料的降水回波被误判为海浪回波的现象。

参考文献

- 江源, 刘黎平, 庄薇. 2009. 多普勒天气雷达地物回波特征及其识别方法改进. 应用气象学报, 20(2): 203-213
- 刘黎平, 吴林林, 杨引明. 2007. 基于模糊逻辑的分步式超折射地物回波识别方法的建立和效果分析. 气象学报, 65(2): 252-260
- 俞小鼎, 张爱民, 郑媛媛等. 2006. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析. 应用气象学报, 17(4): 385-393
- 张亚萍, 程明虎, 徐慧等. 2007. 雷达定量测量降水在佛子岭流域径流模拟中的应用. 应用气象学报, 18(3): 295-305
- Alberoni P P, Andersson T, Mezzasalma P, et al. 2001. Use of the vertical reflectivity profile for identification of anomalous propagation. Meteor Appl, 8(3): 257-266
- Berenguer M, Sempere-Torres D, Sánchez-Diezma R, et al. 2005. Identification of clutter echoes using a fuzzy logic technique // Proceedings of the 32nd Conference on Radar Meteorology, CD-ROM: P4R. 1
- Berenguer M, Sempere-Torres D, Corral C, et al. 2006. A fuzzy logic technique for identifying nonprecipitating echoes in radar scans. J Atmos Oceanic Technol, 23(9): 1157-1180
- Bøwith T, Gill R S, Overgaard S, et al. 2006. Detecting weather radar clutter using satellite-based nowcasting products // Proceedings of the 4th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology
- Fulton R A, Brcidenbach J P, Seo D J, et al. 1998. The WSR-88D rainfall algorithm. Wea Forecasting, 13: 377-395
- Gourley J J, Tabary P, Parent-du-Chatelet J. 2007. A fuzzy logic algorithm for the separation of precipitating from nonprecipitating echoes using polarimetric radar observations. J Atmos Oceanic Technol, 24(8): 1439-1451
- Kessinger C, Ellis S, van Andel J, et al. 2002. NEXRAD Data Quality Optimization-Annual Report for Fiscal Year 2002
- Kessinger C, Ellis S, van Andel J, et al. 2003. The AP clutter mitigation scheme for the WSR-88D // Proceedings of the 31st International Conference on Radar Meteorology. Amer Meteor Soc, 526-529
- Lakshmanan V, Hondl K, Stumpf G, et al. 2003. Quality control of weather radar data using texture features and a neural network // Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Pattern Recognition. Kolkata: IEEE, 15-18
- Lakshmanan V, Valente M. 2004. Real-time quality control of reflectivity data using satellite infrared channel and surface observations // Proceedings of the 20th International Conference on Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, Amer Meteor Soc
- Michelson D B, Sunhede D. 2004. Spurious weather radar echo identification and removal using multisource temperature information. Meteor Appl, 11(1): 1-14
- Ryzhkov A, Zhang P, Doviak R, et al. 2002. Discrimination between weather and sea clutter using doppler and dual-polarization weather radars // Proc of the Open Symposium on Propagation and Remote Sensing
- Steiner M, Smith J A. 2002. Use of three-dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of nonprecipitating echoes in radar data. J Atmos Ocean Technol, 19(5): 673-686
- Zhang J, Wang S, Clarke B. 2004. WSR-88D reflectivity quality control using horizontal and vertical reflectivity structure // Proceedings of the 11th Conference on Aviation, Amer Meteor Soc, P5. 4