

文章编号: 1671-7449(2024)01-0060-06

垂直大气湍流影响下的天气雷达回波信号 优化检测方法

郝孝智¹, 付亚平^{1*}, 李芳², 李延辉¹

(1. 山西省大气探测技术保障中心, 山西 太原 030002; 2. 山西省气象灾害防御中心, 山西 太原 030002)

摘要: 垂直大气湍流导致回波信号在大气中扩散, 使回波信号质量较差, 极易被噪声所淹没, 因此, 提出垂直大气湍流影响下的天气雷达回波信号优化检测方法。通过分析垂直大气湍流对天气雷达回波信号传输特性的影响, 匹配滤波优化算法, 改善垂直大气湍流影响导致质量下降的回波信号, 利用模糊逻辑方法提取回波特征参数并构建对应隶属函数, 设定阈值, 获取天气雷达回波信号检测结果。实验结果表明: 该方法可有效检测不同仰角的天气雷达回波信号, 回波信号波形均匀且波动幅度小, 检测效果较好。

关键词: 垂直大气湍流; 天气雷达; 回波信号; 优化检测; 匹配滤波; 模糊逻辑

中图分类号: P412.25

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024.01.009

引用格式: 郝孝智, 付亚平, 李芳, 等. 垂直大气湍流影响下的天气雷达回波信号优化检测方法[J]. 测试技术学报, 2024, 38(1): 60-65.

HAO Xiaozhi, FU Yaping, LI Fang, et al. Optimal detection method of weather radar echo signal under vertical atmospheric turbulence[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(1): 60-65.

Optimal Detection Method of Weather Radar Echo Signal Under Vertical Atmospheric Turbulence

HAO Xiaozhi¹, FU Yaping^{1*}, LI Fang², LI Yanhui¹

(1. Shanxi Atmospheric Exploration Technology Support Center, Taiyuan 030002, China;

2. Shanxi Provincial Meteorological Disaster Prevention Center, Taiyuan 030002, China)

Abstract: Vertical atmospheric turbulence causes echo signals to diffuse in the atmosphere, resulting in poor echo signal quality and being easily submerged by noise. Therefore, an optimal detection method for weather radar echo signals under the influence of vertical atmospheric turbulence is proposed. Analyze the impact of vertical atmospheric turbulence on the transmission characteristics of weather radar echo signals, and improve the quality degradation of echo signals caused by vertical atmospheric turbulence through matching filter optimization algorithms. Using fuzzy logic methods, extract echo characteristic parameters and construct corresponding membership functions, set thresholds, and obtain weather radar echo signal detection results. Experimental results show that this method can effectively detect weather radar echo signals with different elevation angles, with uniform waveform and small fluctuation amplitude, and good detection effect.

Key words: vertical atmospheric turbulence; weather radar; echo signal; optimized detection; matching filtering; fuzzy logic

收稿日期: 2022-12-01

作者简介: 郝孝智(1964—), 男, 高级工程师, 主要从事通信电子等研究。

* 通信作者: 付亚平(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事大气探测技术、雷电物理等研究。E-mail: yunzhui7385622@163.com。

0 引言

天气雷达是指一类专门用来监测、预警强对流天气的气象雷达,通常是脉冲雷达,主要工作机理是先固定频段上发出一些保留时间较短的脉冲波,然后使用雨水、雪花等降水粒子散射脉冲波,最后利用接收散射来的回波脉冲确定气象目标的空间分布等^[1]。气象雷达的波段范围一般为 $[1,10]$ cm,各波段衰减很小,能更好地进行暴雨等气象的监测。

在天气雷达的工作过程中,必须充分考虑到大气湍流的干扰效果^[2]。大气湍流是一种大气移动方式,它可以明显增强大气中水汽、能量和物质之间的垂直、水平流动能力,而大气湍流的产生也可导致脉冲波在大气中的扩散。

关于天气雷达回波检测,沈妍琰等^[3]通过贝叶斯分类器完成天气雷达回波信号检测,首先,通过统计得出先验概率;然后,分析回波特征获取似然函数;最后,利用贝叶斯分类器完成回波信号检测,该方法有效增强了天气雷达的数据质量,降低了因数据同化对回波造成的不利影响。文浩等^[4]采用模糊逻辑对天气雷达回波进行检测,通过提取回波特征构建隶属函数,然后与设定阈值对比完成回波检测,该算法显著提升了回波检测的准确性。但上述方法存在当检测环境较为恶劣或者检测范围较大的情况下,天气雷达所接收的回波信号质量较差,极易被噪声所淹没,影响检测结果。基于此,本文提出垂直大气湍流影响下的天气雷达回波信号优化检测方法,提升天气雷达回波信号的质量。

1 天气雷达回波信号优化检测

1.1 天气雷达回波信号检测原理

天气雷达回波信号检测原理:通过发射机产生高频脉冲电磁波,经由定向天线发射检测脉冲、接收回波脉冲,脉冲传播过程中存在部分能量的损耗,通过降水粒子散射脉冲电磁波至接收机内,经接收机放大回波脉冲信号,最后在屏幕上显示气象目标物体的回波频率、强度等信息^[5]。气象目标物体与天气雷达间的距离采用脉冲发射、接收的渡越时间测量,脉冲的传播速度为常数。

设置天气雷达测量气象目标物与雷达之间的

距离时,其发射与完成回波接收的渡越时间为 t ,得到气象目标物与雷达之间的距离

$$\eta = \frac{ct}{2}, \quad (1)$$

式中: c 为脉冲在大气中的运动速度。

在脉冲运动速度确定的情况下,所得测距的精度

$$\Delta\eta = \frac{c}{2} \Delta t, \quad (2)$$

式中: $\Delta\eta$, Δt 分别为雷达距离信号、时域信号的分辨率。

1.2 垂直大气湍流对天气雷达回波信号传输特性的影响

垂直大气湍流对天气雷达回波信号的影响表现为天气雷达回波信号的大气折射率跟随时空的变化而任意变化^[6]。而大气折射率的变化判断因素为温度。地表与大气中的热量均源自阳光照射,地表空气受热后开始上升并与高处的冷空气接触出现温度变化,形成垂直大气湍流。

为表现出天气雷达回波信号在大气内的传输特性,采用大气湍流折射率结构函数 E_n 表示垂直大气湍流特性, E_n 定义为

$$E_n(r) = \langle [n(r_1) - n(r_2)]^2 \rangle, L_i \leq r \leq L_o, \quad (3)$$

式中: $n(r_1)$, $n(r_2)$ 分别为空间内 r_1 , r_2 两点的折射率; r 为二者的距离,即 $r = |r_1 - r_2|$; L_i , L_o 分别为垂直大气湍流的内、外尺度; $\langle \rangle$ 为系综平均。

以全面描述垂直大气湍流性质和变化规律为目的,研究折射率结构函数 $E_n(r)$ 的傅里叶变换结果——大气折射率功率频谱 $\phi_n(e)$ (e 为空间频率),常用的大气湍流谱模型 Kolmogorov 谱、Von Karman 谱分别描述为

$$\phi_n(e) = 0.33 C_n^2 e^{-11/3}, 1/L_i \geq e \geq 1/L_o, \quad (4)$$

$$\phi_n(e) = 0.33 C_n^2 (e^2 + e_o^2)^{-11/6}, 1/L_i \geq e \geq 0, \quad (5)$$

式中:垂直大气湍流外尺度相应的空间频率通过 e_o 描述, $e_o = 2\pi/L_o$; C_n^2 为描述垂直大气湍流起伏强度的大气折射率结构常数。

描述垂直大气湍流强度的另一指标为大气相干长度 R ,其是回波信号在垂直大气湍流内传播至距离发射机 z 位置时,脉冲横截面的外差距离。 R 与垂直大气湍流强度呈负相关关系, R 越大则湍流强度越弱,回波信号畸变越少^[7]。基于 Kolmogorov 湍流原理,可得出 R 与 C_n^2 的空间分

布关系为

$$R = \left[0.423N^2 \int_0^L C_n^2(z) dz \right]^{-3/5}, \quad (6)$$

式中： N 为回波信号数； L 为回波信号传播距离。

综上所述，当回波信号在垂直大气湍流内传播时，垂直大气湍流内折射率的起伏导致回波信号产生随机波动，并对应引发相关垂直大气湍流效应。

1.3 基于匹配滤波的天气雷达回波信号优化

受垂直大气湍流影响，回波信号质量下降，直接导致天气雷达回波信号检测精度的降低。为此提出通过分析滤波优化回波信号，匹配滤波器（WF）为接收待检测的回波信号时输出幅值最大、未接收时输出幅值最小的滤波器^[8]，其输出为天气雷达接收的回波信号所具有的信噪比最大值。

将回波信号 $f(N)$ 输入WF，与 $f(N)$ 相随的噪声是高斯白噪声。此时按照最优接收原则可以得到 $f(N)$ 波形相应的WF为

$$h(N) = \nu f^*(\tau - N), \quad (7)$$

式中： ν 为常数； τ 为延迟时间； f^* 为伴有噪声的回波信号。

其离散函数表示为

$$h(K) = \nu f^*(k - K), k = 0, 1, \dots, K - 1, \quad (8)$$

式中： τ 隶属于 $f(N)$ 的自相关函数 $\rho(k - K)$ ； k 为WF长度。若 $k = K$ ，则此时 $(k - K)$ 存在最大值。当 $f(N)$ 为实序列时，此时WF的冲激响应为

$$h(K) = \begin{cases} \nu_s(k - K), & K \geq 0, \\ 0, & K < 0. \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知，WF的冲激响应为 $f(N)$ 的镜像函数，得出WF转移函数 $\epsilon^{j\omega T}$ 的频率特性为

$$H(\epsilon^{j\omega T}) = DFT[h(K)] = \nu \epsilon^{-jk\omega T} S^*(\epsilon^{j\omega T}), \quad (10)$$

式中： DFT 表示镜像函数； T 为周期。

已知WF转移函数取决于频谱函数 $\epsilon^{-jk\omega T}$ 的复共轭 S^* ，说明WF与回波信号间具有最大功率转化的最优搭配，可由此求取输出信噪比最大值，通过WF可准确找出有效的回波信号。

1.4 基于模糊逻辑的天气雷达回波信号优化检测

以功率法为基础，通过模糊逻辑方法对利用匹配滤波器完成优化的天气雷达回波信号进行检测。由于特征分布在许多区域会发生重叠，单一特征参数的划分效度不够，遂选取多个可以有效描述回波

特征的物理参数，依据参数的概率分布构建对应隶属函数，并设定回波信号的取值范围。通过联合多个参数可有效区分不同类型的回波信号。

首先在折射率因子内选取可以描述回波差异的特征参数，折射率因子的延展性 O_{REF} 为

$$O_{REF} = \frac{1}{A_R} \sum_{j=0}^{A_R} A_Z \times 100\% \quad (11)$$

式中：划分效度函数

$$A_Z = \begin{cases} 1, & Z_j = Val, \\ 0, & Z_j \neq Val, \end{cases} \quad (12)$$

式中： Z_j 为方位角上某距离库的折射率因子； Val 为有效检测值； A_R 为折射率因子的距离库数。

当前距离库回波功率的一致性 D_B 为

$$D_B = B_j - \bar{B}, \quad (13)$$

式中：时间、空间一致性匹配函数为

$$B_j = Z_j - 20 \lg O_j, \quad (14)$$

$$\bar{B} = \frac{1}{0.1A} \sum_{j=0.9N}^{A_R} B_j, \quad (15)$$

式中： O_j 为方位角上某距离库和天气雷达的距离。

局部折射率因子回波纹理的一致性 F_{DBZ} 为

$$F_{DBZ} = \frac{1}{11} \sum_{j=-5}^5 (Z_j - Z_{j+1})^2. \quad (16)$$

局部区间内邻近折射率因子的符号变化 S_{PIN} 为

$$S_{PIN} = \sum_{j=-5}^5 M_{S_{PIN}}, \quad (17)$$

式中：折射率范围确认函数为

$$M_{S_{PIN}} = \begin{cases} 1, & \frac{|Z_j - Z_{j-1}| + |Z_{j+1} - Z_j|}{2} > Z_{\text{thresh}}, \\ 0, & \frac{|Z_j - Z_{j-1}| + |Z_{j+1} - Z_j|}{2} \leq Z_{\text{thresh}}, \end{cases} \quad (18)$$

式中： Z_{thresh} 为两个距离库间折射率因子的变化临界值。

依据上述参数的概率分布构建对应隶属函数，研究不同特征参数差异。已知概率分布函数为量化某个距离库反射率因子值，是某种回波信号的置信度，所以，隶属函数形状大致类似于概率分布。按照特征参数 O_{REF} 、 D_R 、 F_{DBZ} 及 S_{PIN} 的概率分布，确定各参数的隶属函数。

针对 O_{REF} 大于80%的回波，求取方位角上某距离库没有接受距离修改的 B_j ，然后运算该距离库所在回波最后10%的有效距离库的 B 的平均

值, 最后运算 D_B , 将 D_R 与所设阈值进行对比, 低于阈值则判定此距离库为待检测的目标回波信号^[9]。

构建包含不同类型天气雷达回波信号的数据库, 通过统计数据库检测结果的临界成功指数 (CSI) 确定权重选择, 具体表示为

$$\gamma = \frac{X_{\text{HIT}}}{X_{\text{ALL}}}, \tag{19}$$

$$\text{CSI} = X_{f^{(N)}_1} \times X_{f^{(N)}_2}, \tag{20}$$

式中: X_{ALL} , X_{HIT} 分别为参与统计、准确检测的总样本数; γ 为检测准确率; $X_{f^{(N)}_1}$ 和 $X_{f^{(N)}_2}$ 为两种回波信号的检测准确率。

选择权重时, 需要应用先验约束条件缩小研究组数, 先验约束条件包括: 1) O_{REF} , D_B 权重占比大于 0; 2) F_{DBZ} , S_{PIN} 的权重占比按照回波信号在 F_{DBZ} 与 S_{PIN} 的概率分布重叠区域多少判断; 3) 单一决策的权重占比不应超过 40%, 各特征参数权重需控制在总权重的 40% 以内。

2 实验分析

以某台雷达站天气雷达为实验对象, 参数详情见表 1。发射机以同倍率发射天线的方式进行高频脉冲电磁波发射, 同口径接收天线的方式进行回波信号检测, 接收机的增益为 40 dB, 带宽为 80 MHz。天气雷达所检测回波信号的数据集内共有 8 000 条回波信号, 信噪比区间为 0~18 dB, 共包括 4 种调制类型 (2PSK, 4PSK, 8PSK, 16QAM), 载波频率的分布集中在 800~850 MHz, 1 400~1 450 MHz 与 2 400~2 450 MHz 范围内, 回波信号长度为 800 个点。

表 1 天气雷达参数详情

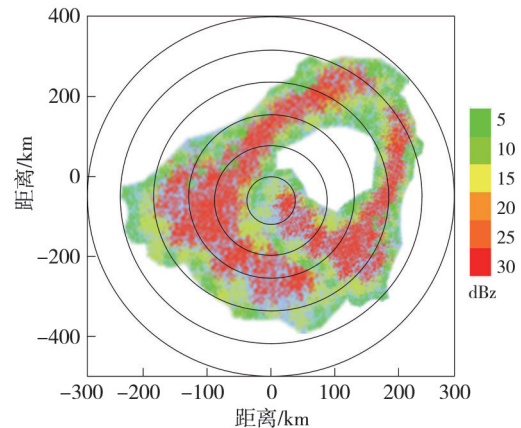
Tab. 1 Details of weather radar parameters

参数名称	数值
电源电压/V	12
天气雷达测距距离/m	0.1~350
天气雷达扫描角度/(°)	0.5
天气雷达测距分辨率/mm	1
天气雷达测量精度/%	0.03
天气雷达采样频率/kHz	70

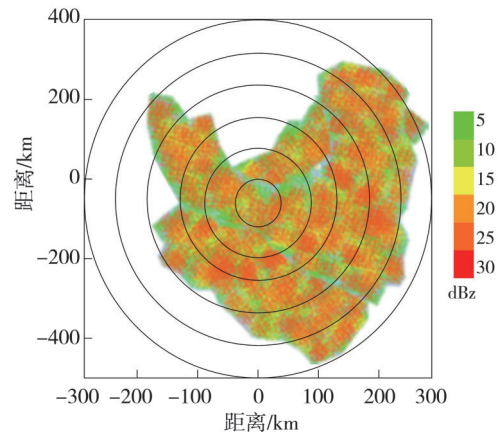
利用本文方法检测 0.5° 和 1.5° 两个仰角下的天气雷达回波信号, 检测结果如图 1 所示。

通过图 1 可以看出, 本文方法能有效检测 0.5° 和 1.5° 两个仰角的天气雷达回波信号, 所检

测的范围相近, 通过本文方法检测的不同仰角天气雷达回波信号没有存在孤岛, 也没有在方位角周围留存任意天气雷达回波信号, 原因是本文方法在检测天气雷达回波信号时, 集合了多个特征参量, 在某一特征参量无法满足阈值的情况下, 其它特征向量可继续进行检测, 不易遗落孤立天气雷达回波信号。这说明本文方法可有效检测不同仰角的天气雷达回波信号, 检测效果较好。



(a) 0.5° 仰角



(b) 1.5° 仰角

图 1 不同仰角下的天气雷达回波信号检测结果

Fig. 1 Detection results of weather radar echo signals at different elevations

分析本文方法检测天气雷达回波信号过程中, 差异湍流外尺度跟随高度的变化结果如图 2 所示。可以发现, 随着高度的增长, 应用本文方法检测的回波信号的垂直湍流外尺度逐渐接近平稳, 在 10~10° 之间波动, 说明其惯性区的最大尺度较为稳定, 可完整获取湍流强度和空间特征尺度的相关参数。

通过本文方法检测天气雷达回波信号过程中, 研究温度变化条件下垂直大气湍流的折射率结构参数随高度的变化情况, 如图 3 所示。

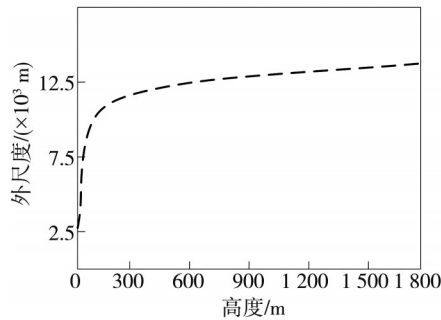


图2 垂直大气湍流外尺度随高度的变化

Fig. 2 Changes in the outer scale of vertical atmospheric turbulence with height

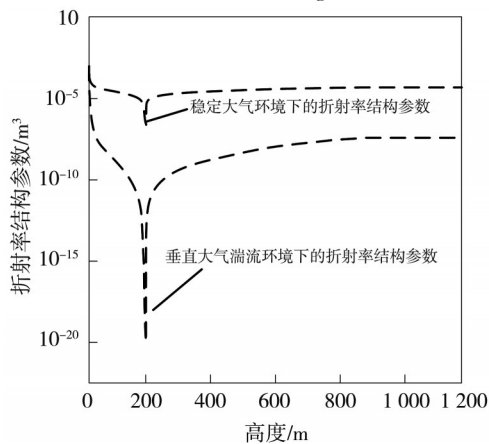


图3 大气折射率结构参数随高度的变化

Fig. 3 Changes in atmospheric refractive index structural parameters with altitude

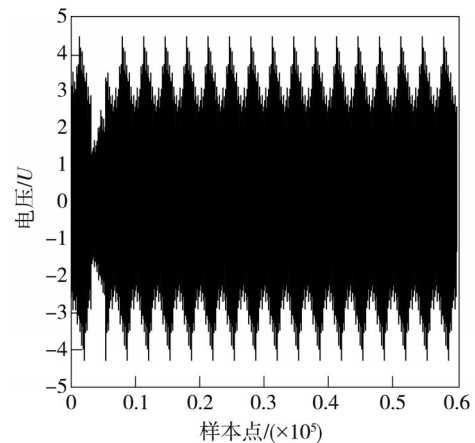
由于跟随高度提升变化最显著的指标是温度，其在垂直大气湍流环境下与高度呈反比例关系，温度的变化公式表示为

$$I = I_0 - (6.047 \times z + 273), \quad (21)$$

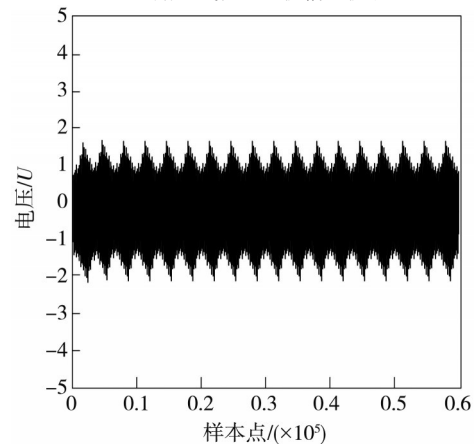
式中： I_0 为地表温度， $^{\circ}\text{C}$ ； z 为距离地面的高度， m 。

根据图3可以看出，与稳定大气环境下的折射率结构参数随高度的变化情况相比，垂直大气湍流折射率结构参数随高度的不断提升，以高度为200m为节点呈先下降后上升态势，在该节点垂直大气湍流折射率结构参数出现波谷，主要是因为温度受高度增长发生变化时，节点位置处的温度出现断点，该情况显著影响了垂直大气湍流折射率结构参数，但在高度为400m后呈微小程度增长且近似平稳。

结合图2、图3可以看出，应用本文方法可有效改善垂直大气湍流对天气雷达回波信号的影响，从根本上优化垂直大气湍流外尺度与折射率结构参数受高度影响发生的变化，令其状态趋于平稳。应用本文方法对所采集天气雷达回波信号进行匹配滤波完成优化，结果如图4所示。



(a) 原始天气雷达回波信号波形



(b) 天气雷达回波信号优化结果

图4 天气雷达回波信号优化结果

Fig. 4 Optimization results of weather radar echo signal

由图4可以看出，初始采集的天气雷达回波信号波形存在抖动且抖动幅度较大，通过本文方法的匹配滤波进行滤波处理后，天气雷达回波信号波形均匀，且波动幅度小，优化效果较好。

对比原始天气雷达回波信号与本文方法检测的天气雷达回波信号，在差异天气雷达功率情况下的信噪比提升效果^[10]如表2所示。

表2 回波信号信噪比提升能力分析

Tab. 2 Analysis of signal to noise ratio improvement ability of echo signal

序号	功率/ μW	初级回波信号信噪比/dB	本文方法信号信噪比/dB	信噪比提升比例
1	650	10.55	26.51	2.52
2	500	7.37	25.73	3.49
3	300	5.46	23.42	4.33
4	150	2.55	17.09	6.68
5	100	1.84	15.37	8.38
6	30	0.48	7.64	15.78
7	10	0.12	5.93	50.77

从表 2 可以看出, 本文方法检测的天气雷达回波信号较原始回波信号的信噪比存在较大幅度的提升, 两种天气雷达回波信号的信噪比均跟随天气雷达功率的减少不断降低, 但利用本文方法检测的天气雷达回波信号的信噪比始终高于原始回波信号, 且信噪比提升比例显著增加, 说明本文方法的天气雷达回波信号检测结果较好, 受垂直大气湍流影响程度较小, 可有效扩充天气雷达在实际中的应用。

3 结论

本文提出垂直大气湍流影响下的天气雷达回波信号优化检测方法, 通过匹配滤波优化垂直大气湍流影响下的天气雷达回波信号, 可有效保留回波信号特征, 增大输出信噪比, 在检测天气雷达回波信号时帮助去除假目标, 较好地提高后续检测精度, 有效扩大了天气雷达回波信号检测的范围。

参考文献:

- [1] 王祺, 王小鹏, 王博辉. 基于优化变分模态分解算法的回波信号去噪[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 79-92.
WANG Qi, WANG Xiaopeng, WANG Bohui. Echo signal denoising based on optimized variational mode decomposition algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(20): 79-92. (in Chinese)
- [2] 黄兴友, 马玉蓉, 胡苏蔓. 基于深度学习的天气雷达回波序列外推及效果分析[J]. 气象学报, 2021, 79(5): 817-827.
HUANG Xingyou, MA Yurong, HU Suman. Extrapolation and effect analysis of weather radar echo sequence based on deep learning[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2021, 79(5): 817-827. (in Chinese)
- [3] 沈妍琰, 黄兴友, 黄书荣, 等. 基于贝叶斯分类器的多普勒天气雷达海浪回波识别和效果检验[J]. 海洋科学, 2020, 44(6): 83-90.
SHEN Yanyan, HUANG Xingyou, HUANG Shurong, et al. Identification and validation of sea-wave echoes collected by a Doppler weather radar based on a Bayes classifier[J]. Marine Sciences, 2020, 44(6): 83-90. (in Chinese)
- [4] 文浩, 张乐坚, 梁海河, 等. 基于模糊逻辑的新一代天气雷达径向干扰回波识别算法[J]. 气象学报, 2020, 78(1): 116-127.
WEN Hao, ZHAN Lejian, LIANG Haihe, et al. Radial interference echo identification algorithm based on fuzzy logic for weather radar[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(1): 116-127. (in Chinese)
- [5] 卢晓光, 范源丹, 李海, 等. 基于垂直载荷因子的增强型湍流检测方法仿真[J]. 现代雷达, 2019, 41(9): 31-36.
LU Xiaoguang, FAN Yuandan, LI Hai, et al. Simulation of enhanced turbulence detection based on vertical load factor[J]. Modern Radar, 2019, 41(9): 31-36. (in Chinese)
- [6] 高云, 郭艳萍, 张叶娥. 基于卷积神经网络的天气雷达回波外推模型[J]. 计算机仿真, 2021, 38(12): 272-275.
GAO Yun, GUO Yanping, ZHANG Yee. Weather radar echo extrapolation model based on convolution neural network[J]. Computer Simulation, 2021, 38(12): 272-275. (in Chinese)
- [7] 于昕迪, 汪玲, 朱岱寅, 等. 基于垂直载荷因子的湍流检测方法实现[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(2): 156-162.
YU Xindi, WANG Ling, ZHU Daiyin, et al. Implementation of a turbulence detection method exploiting vertical load factor[J]. Radar Science and Technology, 2021, 19(2): 156-162. (in Chinese)
- [8] 李海廷, 胡鑫, 曾双, 等. 大气湍流对半主动激光制导中光斑检测精度的影响[J]. 兵工学报, 2021, 42(2): 297-307.
LI Haiting, HU Xin, ZENG Shuang, et al. Influence of atmospheric turbulence on detection accuracy of laser spot[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(2): 297-307. (in Chinese)
- [9] 柴秀梅, 潘新民, 汤志亚, 等. 新一代天气雷达回波强度异常分析与处理方法[J]. 气象, 2011, 37(3): 379-384.
CAI Xiumei, PAN Xinmin, TANG Zhiya, et al. Analysis and handling methods for return intensity anomaly of CINRAD[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(3): 379-384. (in Chinese)
- [10] 马鹏阁, 金秋春, 柳毅, 等. 新型机载多脉冲激光雷达目标信号模拟器[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2068-2072.
MA Tengge, JIN Qiuchun, LIU Yi, et al. New airborne multi-pulse LADAR target signal simulator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2068-2072. (in Chinese)