

基于雷达海杂波的区域性非均匀蒸发波导反演方法

张金鹏 张玉石 吴振森 张玉生 胡荣旭

Inversion of regional range-dependent evaporation duct from radar sea clutter

Zhang Jin-Peng Zhang Yu-Shi Wu Zhen-Sen Zhang Yu-Sheng Hu Rong-Xu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 124101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.124101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

圆极化波反射聚焦超表面

Circularly polarized wave reflection focusing metasurfaces

物理学报.2015, 64(12): 124102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124102>

基于高阻抗表面的多频带 Salisbury 屏设计

Design of multiband Salisbury screen based on high impedance surfaces

物理学报.2015, 64(11): 114101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114101>

基于超材料吸波体的低雷达散射截面波导缝隙阵列天线

Low-RCS waveguide slot array antenna based on a metamaterial absorber

物理学报.2015, 64(9): 094102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094102>

二维宽带相位梯度超表面设计及实验验证

Design and verification of a two-dimensional wide band phase-gradient metasurface

物理学报.2015, 64(9): 094101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094101>

基于宽带吸波体的微带天线雷达散射截面缩减设计

Radar cross section reduction of microstrip antenna based on wide-band metamaterial absorber

物理学报.2015, 64(8): 084101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084101>

基于雷达海杂波的区域性非均匀蒸发波导反演方法*

张金鹏^{1)†} 张玉石¹⁾ 吴振森²⁾ 张玉生¹⁾ 胡荣旭²⁾

1)(中国电波传播研究所青岛分所, 青岛 266107)

2)(西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2014年12月2日收到; 2014年12月19日收到修改稿)

由于不同海域上空气象条件的不同, 海上蒸发波导在大尺度海面上空发生时通常是区域性非均匀的, 这一特性使得该环境中的电波传播特性相对于水平均匀的蒸发波导环境情况而明显不同, 因此, 进行区域性非均匀的蒸发波导探测反演对正确预测电波传播特性及提高雷达系统的工作性能具有重要的意义. 考虑到实际应用中蒸发波导信息获取手段的多样性, 将中尺度数值气象模式MM5预报的区域性蒸发波导修正折射率剖面作为先验信息, 提出了一种含该先验信息的区域性非均匀蒸发波导的雷达海杂波后验概率估计模型. 该模型使用主分量分析法对蒸发波导的水平非均匀性进行参数化建模, 然后通过贝叶斯理论将修正折射率剖面参数的先验概率分布、后验概率分布和似然函数联系起来, 利用雷达海杂波实现蒸发波导剖面参数的最大后验概率估计反演. 通过我国东海海域的实际区域性非均匀蒸发波导反演测试, 表明该模型能够以更高的精度实现区域性非均匀蒸发波导的反演.

关键词: 雷达海杂波, 蒸发波导, 水平非均匀, 反演方法

PACS: 41.20.Jb, 43.28.We

DOI: 10.7498/aps.64.124101

1 引言

蒸发波导是一种发生在海面边界上空对流层大气中的极端异常负梯度折射率结构, 能够陷获一定频率和发射仰角的电磁波而发生对流层波导传播, 这种异常传播机理对工作在海洋大气环境中的雷达、移动通信等无线电系统的性能具有严重的影响^[1-3]. 一般情况下, 蒸发波导形成的气象原因来自于海水蒸发造成的海洋边界层大气的逆湿与逆温现象^[4]. 由于不同海域上空的气象条件通常是不同的, 因此蒸发波导在大尺度海面上空发生时通常是区域性且非均匀的. Goldhirsh和Dockery^[5]使用近似为标准大气的修正折射率(M)剖面实验数据评估了假设水平均匀M剖面时引起的传播损耗误差, 结果表明, 在实际的海洋环境中, M剖面的水

平均匀性假设会导致电磁波的传播损耗空间分布出现很大的预测误差. 因此对海上蒸发波导而言, 进行区域性非均匀蒸发波导M剖面的探测反演对评估与提高雷达系统的工作性能具有重要的意义.

由于海杂波在传播过程中受大气环境的影响而携带有丰富的大气折射率信息, 因此, 利用实测雷达海杂波数据反演海上大气折射率成为海上对流层波导探测反演的重要手段^[6-9]. 2000年, Rogers等^[10]首次使用Wallops'98雷达海杂波实验数据对水平均匀的海上蒸发波导进行了反演, 并分析了海面散射系数与擦地角之间的关系对反演结果的影响. 2003年, Gerstoft等^[11]提出了使用遗传算法从雷达海杂波功率数据估计水平非均匀大气折射率的方法. 他们将大气折射率剖面在垂直方向使用5个参数建模, 水平方向使用6个参数建

* 国家自然科学基金(批准号: 41175012, 41205024, 41305024)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhjinpeng@hotmail.com

模,反演了 Wallops'98 实验获得的海上水平非均匀表面波导 M 剖面. 2006 年, Yardim 等^[12]提出了使用马尔可夫链-蒙特卡罗采样技术对 M 剖面参数空间采样,基于雷达海杂波后验概率密度反演海上对流层波导的方法. 该方法能够同时给出波导 M 剖面的最优点估计和反演不确定性估计. 近年来,文献^[13, 14]使用变分伴随正则化方法,基于雷达回波资料进行了海上对流层波导的反演. Zhao 等^[15, 16]分别使用到达角谱和模拟退火算法进行了海上大气 M 剖面的雷达海杂波反演,提高了反演精度. 以上反演方法都尝试在雷达海杂波实测数据的基础上,利用不同的技术和手段来反演海洋上空某一路径上的均匀或非均匀大气折射率剖面,实施的难易程度和反演精度不同,但都不适用于实际海洋环境中区域性对流层波导 M 剖面的反演. 另外,除雷达海杂波外,上述反演方法都没有采用其他的反演输入信息或辅助信息.

在实际应用中,除利用雷达海杂波进行对流层波导的反演外,海上大气 M 剖面信息还经常使用中尺度数值气象预报的方法来获取^[17]. 例如,利用中尺度数值气象模式 MM5 网格嵌套的方式可以预报获得关心海域上空水平分辨率为 10 km 的气象要素信息,进而通过大气折射率算法得到相应的 M 剖面信息^[18]. 上述两种方法都可以获得海上对流层波导的 M 剖面信息,但目前两者的融合性研究还较少. 实质上,数值预报的结果可用于提高对流层波导的雷达海杂波反演精度,反过来雷达海杂波反演的结果可以影响数值预报中的小尺度数据同化,进而提高波导预报的精度,两者是一种互惠的关系.

基于雷达海杂波的蒸发波导反演可以看成是一种在已知实测海杂波功率信息的条件下估计蒸发波导 M 剖面的最大似然(或最大后验概率)估计问题,对应似然函数最大的 M 剖面结构即为反演结果. 本文考虑到实际海洋环境中蒸发波导的区域非均匀性,以及波导信息获取手段的多样性,将中尺度数值气象模式 MM5 预报的区域性蒸发波导 M 剖面作为先验信息,提出了一种含该先验信息的区域性非均匀蒸发波导的雷达海杂波后验概率估计模型. 该模型首先使用主分量分析法对水平非均匀的蒸发波导 M 剖面进行参数化建模,然后通过贝叶斯理论将蒸发波导 M 剖面参数的先验概率分布、后验概率分布和似然函数联系起来,利用雷达海杂波实现 M 剖面参数的最大后验概率估计. 通过我国东海海域的区域性非均匀蒸发波导反演测试,表

明该模型在成功实现区域性非均匀蒸发波导反演的基础上,通过将历史数值预报的结果作为先验信息,有效地提高了反演精度,降低了反演不确定度.

2 水平非均匀蒸发波导的主分量建模

海上对流层波导 M 剖面结构的反演要基于参数化的 M 剖面结构模型. 对于蒸发波导而言,其垂直 M 剖面结构通常使用 Paulus-Jeske 模型^[19]描述:

$$M(z) = M_0 + 0.125z - 0.125h \ln [(z + z_0)/z_0], \quad (1)$$

式中, z 为海面上的垂直高度; z_0 为空气动力学粗糙度因子,通常取 1.5×10^{-4} m; M_0 为海面处的大气修正折射率; h 代表蒸发波导高度.

根据(1)式可以对水平均匀的蒸发波导垂直 M 剖面结构进行反演,然而,要对 M 剖面的水平非均匀性进行反演,就需要在折射率环境模型中添加水平方向的自由度,体现在参数上就是蒸发波导垂直 M 剖面参数可以随距离自由变化. 理想化的水平非均匀性建模可通过定义所有垂直 M 剖面参数在不同距离处的自由度,实现对大气折射率结构的精细描述. 然而,由于水平方向的自由度太多,使得 M 剖面结构的反演很难实现. 本文使用基于 Karhunen-Loeve 变换^[20]的主分量分析法,提取蒸发波导高度水平向变化的主分量来建立新的低维坐标系,通过各维度即各主分量的加权实现蒸发波导 M 剖面的低自由度(低维)水平非均匀性建模. 建模步骤如下.

1) 水平非均匀蒸发波导高度样本的马尔可夫链生成

海上蒸发波导的形成取决于海上大尺度范围内的气象要素分布,这些气象要素的空间连续性导致了蒸发波导高度在水平方向的渐变特性,使其满足马尔可夫过程的性质.

蒸发波导高度的水平非均匀变化可由如下的马尔可夫链模拟实现:

$$H = [h_1, h_2, \dots], \quad (2)$$

$$h_1 = h_0, \quad (3)$$

$$h_{i+1} = h_i + \eta_i, \quad (4)$$

$$\eta_i \sim N(0, \sigma_\eta^2), \quad (5)$$

式中, h_0 和 h_i 分别代表初始距离处和第 i 个距离步处的蒸发波导高度; η 是均值为 0, 方差为 σ_η^2 的高斯分布随机数, 用于表征蒸发波导高度的起伏; 由所有水平距离处蒸发波导高度 $h_i (i = 1, 2, \dots)$ 构成的多维随机变量 H 为一个马尔可夫链. 通过模拟多个马尔可夫链, 可以形成水平非均匀蒸发波导高度的样本矩阵, 用于水平非均匀变化特征的主分量分析.

图 1 给出了蒸发波导高度水平向变化的 50 次马尔可夫链模拟实现. 其中, 初始蒸发波导高度 h_0 为 20 m, 距离采样间隔为 1 km, 波导高度起伏标准差 σ_η 为 1 m. 从图 1 可以看出, 50 种水平变化情况基本涵盖了波导高度可能具有的变化趋势, 在实际进行水平变化特征的主分量提取分析时, 一般需要更多的马尔可夫链实现以保证主分量的精度.

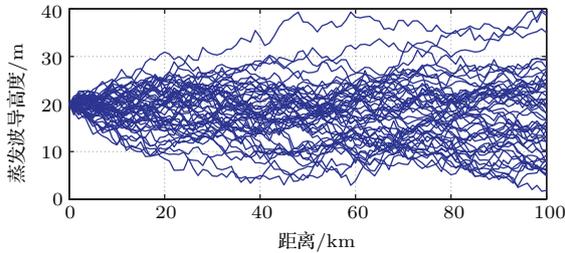


图 1 蒸发波导高度的马尔可夫链模拟实现

Fig. 1. Markov realization of evaporation duct height.

2) 蒸发波导高度水平非均匀变化特征的主分量提取

根据多条马尔可夫链形成的蒸发波导高度样本矩阵求出其协方差矩阵, 并进行特征值特征向量分解, 对应特征值较大的几个特征向量即构成蒸发波导高度水平变化的主分量.

主分量提取的主要过程为: 设 $\{H_1, H_2, \dots, H_m\}$ 为来自 n 维蒸发波导高度随机变量 H 的一个样本集, 即

$$H_i = (h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{in}) \in R^n \quad (i = 1, 2, \dots, m). \quad (6)$$

将这些样本按照每一行为一个样本, 每一列为一个维度组成蒸发波导高度样本矩阵为

$$S = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{m1} & h_{m2} & \dots & h_{mn} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

由于 n 维蒸发波导高度随机变量 H 的协方差矩阵元素定义为

$$\text{Cov}(h_j, h_k) = E[(h_j - E(h_j))(h_k - E(h_k))] \quad (j, k = 1, 2, \dots, n). \quad (8)$$

因此, 要计算协方差矩阵需要首先将 (7) 式的样本矩阵进行中心化, 即去除每一维度上的均值. 假设中心化的新样本矩阵为 S' , 则协方差矩阵可以表示为

$$C = \frac{S'^T S'}{m-1} \quad (C \in R^{n \times n}). \quad (9)$$

其主对角线上的元素代表各维度上的蒸发波导高度方差, 其他元素代表两个不同维度间的蒸发波导高度协方差, 即相关性. 为了使得保留下来的维度间的相关性尽可能小, 需要对矩阵 C 进行对角化, 即找到一个正交矩阵 P 满足

$$C = P \Lambda P^T, \quad (10)$$

其中, Λ 为特征值矩阵, P 为特征向量矩阵. 假设 C 的秩为 p , 则 C 有 p 个非零的特征值, 记为

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p > 0. \quad (11)$$

如果取最大的前 q 个特征值对应的维度, 则这 q 个特征值组成了新的特征值矩阵 $\Lambda_1 \in R^{q \times q}$, 对应的 q 个特征向量组成了新的特征向量矩阵 $P_1 \in R^{n \times q}$. P_1 的每一列为一个特征向量, q 个特征向量构成了低维空间新的坐标系, 即为蒸发波导高度水平变化特征的“主分量”.

对于图 1 中给出的水平非均匀蒸发波导高度样本集, 若设定主分量代表的蒸发波导高度水平变化特征占总体特征的 95%, 则共有 5 个相应的特征值与特征向量 (主分量), 如图 2 所示.

3) 特征向量坐标系下的水平非均匀蒸发波导高度建模

利用从蒸发波导高度随机变量 H 的协方差矩阵中提取的特征值和特征向量 (主分量), 可以将水平非均匀蒸发波导高度表示为

$$h(x; c_1, \dots, c_q) = h_0 + \sum_{i=1}^q c_i v_i(x), \quad (12)$$

式中, q 为选取的特征向量个数; $v_i(x)$ 表示第 i 个特征向量; c_i 为对应第 i 个特征向量的系数, 在进行非均匀蒸发波导高度的建模时, 从均匀分布 $c_i \in U(-\sqrt{\lambda_i}, \sqrt{\lambda_i})$ 中取值. 原则上, 通过 c_i 的不同取值, 利用 (12) 式可以模拟出所有蒸发波导高度的水平变化情况.

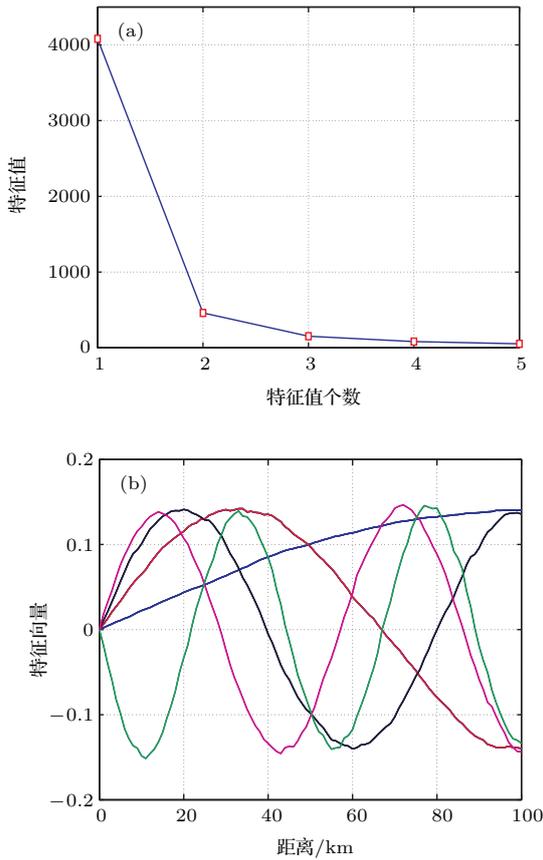


图2 (网刊彩色) 蒸发波导高度协方差矩阵的前5个特征值与特征向量 (a) 特征值; (b) 特征向量
Fig. 2. (color online) First five eigenvalues and eigenvectors of the covariance matrix of evaporation duct height: (a) eigenvalues; (b) eigenvectors.

图3给出了利用前5个特征向量模拟的8种蒸发波导高度水平非均匀变化情况. 蒸发波导高度的水平非均匀性建模后, 即可利用(1)式给出的蒸发波导垂直M剖面模型对不同距离处的大气M剖面进行建模, 从而构造出全空间的大气修正折射率结构.

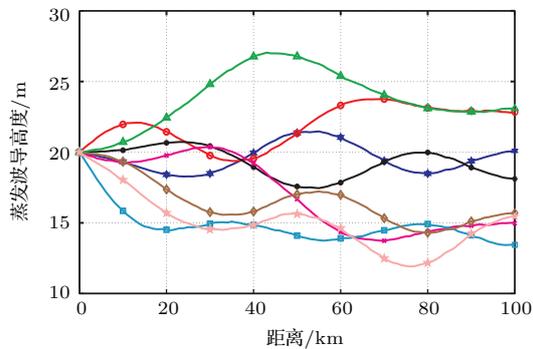


图3 (网刊彩色) 基于主分量的水平非均匀蒸发波导高度模拟
Fig. 3. (color online) Simulations of the range-dependent evaporation duct height using principal components.

3 含历史数值预报先验信息的区域非均匀蒸发波导反演模型

3.1 水平非均匀蒸发波导的反演方法

根据上节给出的水平非均匀蒸发波导M剖面建模方法, 本文利用雷达海杂波反演得到蒸发波导高度水平变化的主分量系数, 然后使用这些系数对主分量加权获得整个空间的非均匀蒸发波导M剖面反演结果. 本文建立反演流程如下.

1) 对实测雷达海杂波功率数据进行预处理, 得到目标杂波功率向量 $\mathbf{P}_c^{\text{obs}}$.

2) 对蒸发波导垂直M剖面结构进行参数化建模, 生成描述大气垂直M剖面结构的参数向量 \mathbf{m}_v . 对于(1)式给出的M剖面对数线性模型, 参数向量 \mathbf{m}_v 仅包含蒸发波导高度一个参数.

3) 根据垂直M剖面参数的敏感性高低, 确定 \mathbf{m}_v 中进行水平非均匀性建模的参数, 构成具有非均匀性的垂直M剖面基础参数向量 \mathbf{m}_{v0} .

4) 对 \mathbf{m}_{v0} 中各参数的水平非均匀性进行主分量分析, 确定用于反演的主分量的个数 q , 每一主分量对应一个加权系数 c . \mathbf{m}_{v0} 和各系数 c 的组合即构成有待优化的蒸发波导M剖面参数向量 $\mathbf{m} = [\mathbf{m}_{v0}, c_1, c_2, \dots, c_q]$.

在上节给出的主分量分析方法中, 通常是根据特征值的累计贡献率 $\sum_{i=1}^q \lambda_i / \sum_{j=1}^p \lambda_j$ 来选取主分量的个数, 但这在波导M剖面参数非均匀性的反演中是有局限性的. 因为在未知传播损耗(或海杂波功率)对各非均匀性系数敏感性的前提下, 并不能确定临界累计贡献率的大小, 取值过大会导致主分量的个数太多, 而后面的一些系数的传播损耗敏感性可能不高, 使得这些系数不能很好地反演出, 且数量较多的参数导致反演优化的难度增大; 取值过小会导致主分量个数太少, 较少的基向量不能对非均匀性进行完备的描述.

本文使用主分量系数变化引起的传播损耗的距离向斜率变化量来描述该主分量系数的敏感性大小, 从而决定是否选用该系数进行反演, 即

$$S_c = \frac{1}{N_c} \sum_{i=2}^{N_c} \sum_{x=x_0}^{x_f} [(L(x, c_i) - L(x, c_{i-1})) - (\bar{L}(c_i) - \bar{L}(c_{i-1}))], \quad (13)$$

式中, x_0 和 x_f 分别表示用于反演的传播损耗(对应于杂波功率)的最小和最大距离; $L(x, c_i)$ 和 $\bar{L}(c_i)$

分别为主分量系数 c 取第 i 个离散值时对应的距离 x 处的传播损耗和整个反演路径 x_0-x_f 上的平均传播损耗; N_c 为系数 c 的离散个数. 当 S_c 大于某一临界值 S_0 时即认为该系数 c 和相应的主分量可以用于蒸发波导 M 剖面结构反演.

图 4 给出了蒸发波导高度水平非均匀性前三个主分量系数变化引起的传播损耗距离向斜率变

化量, 各系数的离散个数 $N_c = 60$. 通过该变化可以直观地看出各主分量系数的敏感性. 由 (13) 式求出的各参数的敏感性为 $S_{c_1} = 359.66$, $S_{c_2} = 126.15$, $S_{c_3} = 25.73$, 若令临界敏感性值 S_0 为 50.0, 则第三个主分量将不用于非均匀蒸发波导 M 剖面反演, 需要优化的大气 M 剖面参数为蒸发波导高度、 c_1 和 c_2 .

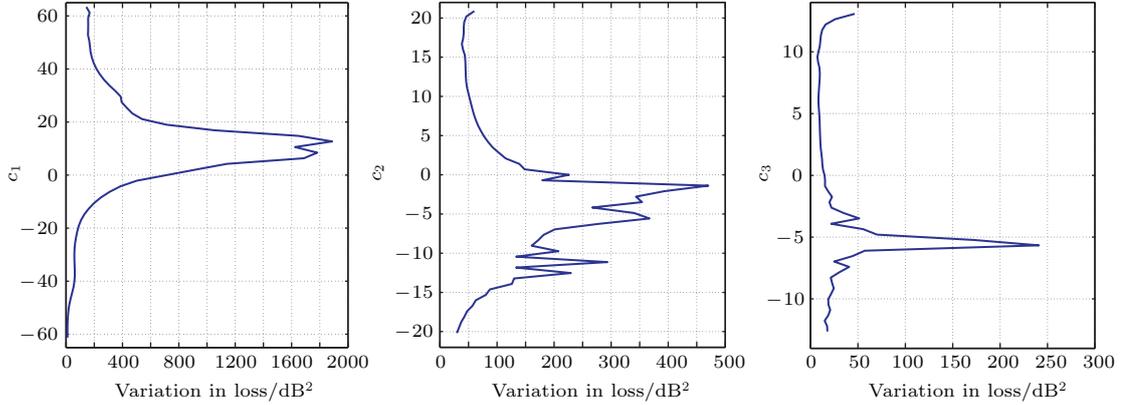


图 4 蒸发波导水平非均匀性引起的传播损耗距离向斜率变化量

Fig. 4. Variation of the slope in range of the path loss caused by the range-dependent property of evaporation duct.

5) 根据基于抛物方程的对流层波导电波传播理论 [21], 正演模拟大气修正折射率结构参数向量为 \mathbf{m} 时的雷达海杂波功率, 生成仿真的杂波功率向量 $\mathbf{P}_c^s(\mathbf{m})$.

6) 使用带线性距离权重的自适应目标函数 [22] 对实测雷达海杂波功率 $\mathbf{P}_c^{\text{obs}}$ 与正演模拟杂波功率 $\mathbf{P}_c^s(\mathbf{m})$ 之间的符合程度进行评价, 即

$$\phi(\mathbf{m}) = \sum_{x=x_0}^{x_f(\mathbf{R}, \text{CNR}_{x_0})} \left(f^2(x) \times \frac{x_f(\mathbf{R}, \text{CNR}_{x_0}) - x}{x_f(\mathbf{R}, \text{CNR}_{x_0}) - x_0} \right), \quad (14)$$

$$f(x) = P_c^r(x) - P_c(x, \mathbf{m}) - (\bar{P}_c^r - \bar{P}_c(\mathbf{m})), \quad (15)$$

式中, x_f 取决于雷达系统参数 \mathbf{R} 和初始反演距离 x_0 处的杂噪比 (CNR) 在反演过程中自适应变化;

$$\bar{P}_c^r = \frac{1}{N_x} \sum_{x=x_0}^{x_f} P_c^r(x)$$

和

$$\bar{P}_c(\mathbf{m}) = \frac{1}{N_x} \sum_{x=x_0}^{x_f} P_c(x, \mathbf{m})$$

分别表示实测和正演模拟的海杂波功率在反演区

间的均值, 其中 N_x 为反演区间 $[x_0, x_f]$ 中的距离步进数. 另外, (14) 式表示的目标函数中加入了用于降低远距离处杂波观测信息对目标函数贡献的线性距离权重.

7) 利用优化算法对目标函数进行优化, 对应适应度值最小 (即符合程度最好) 的蒸发波导 M 剖面参数向量 $\hat{\mathbf{m}}$ 即为反演结果, 通过 M 剖面模型即可构造出大气的修正折射率结构 $\mathbf{M}(\hat{\mathbf{m}})$.

3.2 区域性非均匀蒸发波导的后验概率估计模型

由于基于雷达海杂波和中尺度数值气象模式 MM5 都可以获得海上蒸发波导信息, 因此为了提高蒸发波导 M 剖面的雷达海杂波反演精度, 本文将蒸发波导数值预报的结果作为先验信息, 在上节给出的水平非均匀蒸发波导反演方法基础上, 提出了含历史数值预报先验信息的区域性非均匀蒸发波导后验概率估计模型.

假设第 i 个雷达方位向上的水平非均匀蒸发波导 M 剖面参数向量为 \mathbf{m}_i , 则蒸发波导数值预报的结果作为先验信息可通过贝叶斯公式体现在 \mathbf{m}_i 的后验概率密度中, 即

$$p(\mathbf{m}_i | \mathbf{P}_i^{\text{obs}}) = \frac{p(\mathbf{P}_i^{\text{obs}} | \mathbf{m}_i) p(\mathbf{m}_i)}{p(\mathbf{P}_i^{\text{obs}})}, \quad (16)$$

其中

$$p(\mathbf{P}_i^{\text{obs}}) = \int_{\mathbf{m}_i} p(\mathbf{P}_i^{\text{obs}} | \mathbf{m}_i) p(\mathbf{m}_i) d\mathbf{m}_i, \quad (17)$$

式中, $\mathbf{P}_i^{\text{obs}}$ 代表第 i 个雷达方位向上的实测雷达海杂波功率向量; $p(\mathbf{m}_i)$ 代表蒸发波导 M 剖面参数向量 \mathbf{m}_i 反演之前的历史数值预报先验概率分布信息, 与实测杂波功率 (后验信息) 无关; $p(\mathbf{P}_i^{\text{obs}})$ 为与参数向量 \mathbf{m}_i 无关的归一化因子, 在实际计算时可以不考虑, 即

$$p(\mathbf{m}_i | \mathbf{P}_i^{\text{obs}}) \propto p(\mathbf{P}_i^{\text{obs}} | \mathbf{m}_i) p(\mathbf{m}_i); \quad (18)$$

$p(\mathbf{P}_i^{\text{obs}} | \mathbf{m}_i)$ 为 M 剖面参数向量为 \mathbf{m}_i 的情况下, 正演模拟得到实测杂波功率向量 $\mathbf{P}_i^{\text{obs}}$ 的条件概率, 称为杂波功率观测数据关于蒸发波导参数的似然函数, 记为 $L(\mathbf{m}_i) = p(\mathbf{P}_i^{\text{obs}} | \mathbf{m}_i)$.

似然函数可以根据实测和模拟的雷达海杂波数据之间的关系得到. 在忽略接收机噪声情况下, 实测海杂波功率与模拟功率之间的关系可表示为

$$P^{\text{obs}}(x) = P^s(x, \mathbf{m}_i) + n_{\text{RCS}}, \quad (19)$$

式中, n_{RCS} 为对数域中由于海杂波随机起伏而引入的零均值随机噪声误差, 实质上对应于不同的海杂波统计分布, 从而得到不同的似然函数.

假设实测与模拟雷达海杂波数据之间的误差服从高斯分布, 即实测海杂波服从对数正态分布, 则似然函数^[12]可以表示为

$$L(\mathbf{m}_i) = (2\pi)^{-N_{\text{R}}/2} |\mathbf{C}_{\mathbf{P}}|^{-1/2} \times \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{P}_i^s(\mathbf{m}_i) - \mathbf{P}_i^{\text{obs}})^{\text{T}} \times \mathbf{C}_{\mathbf{P}}^{-1} (\mathbf{P}_i^s(\mathbf{m}_i) - \mathbf{P}_i^{\text{obs}}) \right], \quad (20)$$

其中,

$$\begin{aligned} & \|\mathbf{P}_i^s(\mathbf{m}_i) - \mathbf{P}_i^{\text{obs}}\|^2 \\ &= \sum_{k=1}^{N_{\text{R}}} |P^s(x_k, \mathbf{m}_i) - P^{\text{obs}}(x_k)|^2, \end{aligned} \quad (21)$$

(21) 式可以定义为一个关于 \mathbf{m}_i 的匹配性误差函数 $\Phi(\mathbf{m}_i)$. N_{R} 代表实测杂波功率向量 $\mathbf{P}_i^{\text{obs}}$ 的长度, 即距离步进的个数; $\mathbf{C}_{\mathbf{P}}$ 为根据多个实测杂波功率向量样本求出的协方差矩阵, 假设每一距离步进 x_k 处的杂波功率为独立同分布的, 则 $\mathbf{C}_{\mathbf{P}}$ 可简化为 $\mathbf{C}_{\mathbf{P}} = \nu \mathbf{I}$ (ν 为方差, \mathbf{I} 为单位矩阵), 即 (20) 式可

简化为

$$L(\mathbf{m}_i) = (2\pi\nu)^{-N_{\text{R}}/2} \exp \left(-\frac{\Phi(\mathbf{m}_i)}{2\nu} \right). \quad (22)$$

根据 (22) 式, (18) 式可以表示为

$$p(\mathbf{m}_i | \mathbf{P}_i^{\text{obs}}) \propto p(\mathbf{m}_i) L(\mathbf{m}_i) \propto p(\mathbf{m}_i) \exp \left(-\frac{\Phi(\mathbf{m}_i)}{2\nu} \right), \quad (23)$$

式中, $p(\mathbf{m}_i)$ 代表基于历史数值预报结果的蒸发波导参数向量 \mathbf{m}_i 的先验概率密度, 本文中使用归一化的高斯分布函数按如下方式构建:

$$p(\mathbf{m}_i) = \exp \left(-\frac{\psi(\mathbf{m}_i)}{2\sigma_{\text{M}}^2} \right), \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \psi(\mathbf{m}_i) &= \int_{r_0}^{r_f} \int_0^{z_f} \left| M(z, r, \mathbf{m}_i) \right. \\ &\quad \left. - M(z, r, \mathbf{m}_i^{\text{NP}}) \right|^2 dz dr, \end{aligned} \quad (25)$$

式中, z 为高度; z_f 为有待反演的蒸发波导 M 剖面高度; r 为地面距离; r_0 和 r_f 分别为 M 剖面的最小和最大距离; $M(z, r, \mathbf{m}_i)$ 代表由水平非均匀蒸发波导剖面模型计算的剖面参数向量为 \mathbf{m}_i 时 (z, r) 处的大气修正折射率; $M(z, r, \mathbf{m}_i^{\text{NP}})$ 为数值预报 (numerical prediction) 的波导参数向量是 \mathbf{m}_i^{NP} 时的修正折射率; $\psi(\mathbf{m}_i)$ 表示建模的空间修正折射率结构与数值预报的结构之间的偏差; σ_{M} 为修正折射率相对于数值预报结果 (作为高斯分布的均值) 的标准差. 由 (24) 式可以看出, 当 $\psi(\mathbf{m}_i) = 0$ 时, 即建模的修正折射率结构与历史数值预报的结构完全一致时 (亦即 $\mathbf{m}_i = \mathbf{m}_i^{\text{NP}}$ 时), $p(\mathbf{m}_i) = 1$, 表示此时的蒸发波导参数向量 \mathbf{m}_i 具有最大的先验概率, 加到似然函数 $L(\mathbf{m}_i)$ 上的权重最大.

对于 (1) 式给出的蒸发波导模型而言, 由于波导参数向量 \mathbf{m}_i 仅包括蒸发波导高度 h 一个参数, 因此 (25) 式中的偏差 ψ 可定义为

$$\psi(h_i) = \int_{r_0}^{r_f} |h_i(r) - h_i^{\text{NP}}(r)|^2 dr, \quad (26)$$

式中 $h_i^{\text{NP}}(r)$ 表示数值预报的第 i 个雷达方位向上距离 r 处的蒸发波导高度.

(24), (25) 和 (26) 式即为使用概率密度表示的蒸发波导数值预报先验信息, 用它对似然函数加权得到 M 剖面参数向量 \mathbf{m}_i 的后验概率密度 ((23) 式) 后, 对应后验概率密度最大的 \mathbf{m}_i 即为第 i 个雷达方位向路径上的蒸发波导贝叶斯最大后验估计解.

区域性非均匀对流层波导可以通过整合所有雷达方位向上的 M 剖面参数向量的最大后验估计

$\hat{m}_i (i = 1, 2, \dots, N_{AZ})$ 得到, 其中 N_{AZ} 代表离散的雷达方位角个数. 由于实际海洋上空的蒸发波导 M 剖面是空间连续的, 不可能存在剖面参数的突变, 因此我们对不同方位向上波导参数的最大后验估计 \hat{m}_i 进行光滑连续性处理, 即

$$\hat{m}_{sm,i}^j = \frac{\rho_{i-1}^j \hat{m}_{i-1}^j + \lambda \rho_i^j \hat{m}_i^j + \rho_{i+1}^j \hat{m}_{i+1}^j}{\rho_{i-1}^j + \lambda \rho_i^j + \rho_{i+1}^j} \quad (j = 1, 2, \dots, N_m), \quad (27)$$

式中, N_m 表示 M 剖面参数向量包含的参数个数; \hat{m}_i^j 为第 i 个雷达方位向上第 j 个剖面参数的贝叶斯最大后验估计值; $\hat{m}_{sm,i}^j$ 为相应的方位向光滑处理后的参数估计值; λ 为第 i 个方位向参数值与第 $i-1, i+1$ 个方位向参数值的权重比值, 通常可以设为 2.0. 为了体现出不同方位向上最大后验估计值的准确度对 $\hat{m}_{sm,i}^j$ 的影响, (27) 式中引入了参数 ρ_i^j 来量化波导参数 \hat{m}_i^j 的贝叶斯估计不确定性, 如下:

$$\rho_i^j = \frac{\int_{\hat{m}_i^j - \Delta m^j}^{\hat{m}_i^j + \Delta m^j} p(\mathbf{m}_i^j | \mathbf{P}_i^{\text{obs}}) d\mathbf{m}_i^j}{\int \mathbf{m}_i^j p(\mathbf{m}_i^j | \mathbf{P}_i^{\text{obs}}) d\mathbf{m}_i^j}, \quad (28)$$

式中, $p(\mathbf{m}_i^j | \mathbf{P}_i^{\text{obs}})$ 表示第 i 个方位向上第 j 个剖面参数的一维边缘后验概率密度, 可以通过 (23) 式积分得到; Δm^j 为设定的第 j 个剖面参数的偏移量, 该偏移量越大, ρ_i^j 越趋近于 1. (28) 式定义的参数 ρ_i^j 即以最大后验估计量 \hat{m}_i^j 为中心, $[\hat{m}_i^j - \Delta m^j, \hat{m}_i^j + \Delta m^j]$ 之间的后验累积概率密度占总概率密度的比重, 可以表征最大后验估计值 \hat{m}_i^j 的不确定性.

为提高计算效率, 本文中贝叶斯后验概率密度 $p(\mathbf{m}_i | \mathbf{P}_i^{\text{obs}})$ 和各波导参数向量的一维边缘后验概率密度 $p(\mathbf{m}_i^j | \mathbf{P}_i^{\text{obs}})$ 使用马尔可夫链-蒙特卡罗采样方法 [12,23] 计算.

4 区域性非均匀蒸发波导反演模型性能分析

本节使用中尺度数值气象模式 MM5 数值预报的我国东海海域的区域性蒸发波导作为海上实际的非均匀折射率环境, 并以此作为先验信息, 基于该环境下加噪声的伪实测雷达海杂波功率对区域性非均匀蒸发波导进行了反演, 验证本文提出的含数值预报先验信息的蒸发波导后验概率估计模型的性能.

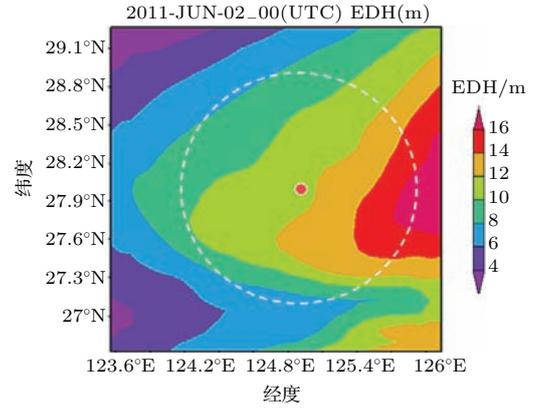


图5 (网刊彩色) MM5 数值预报的我国东海部分海域的蒸发波导高度 (m) 分布

Fig. 5. (color online) The evaporation duct height (m) of a part area of East China Sea predicted by MM5.

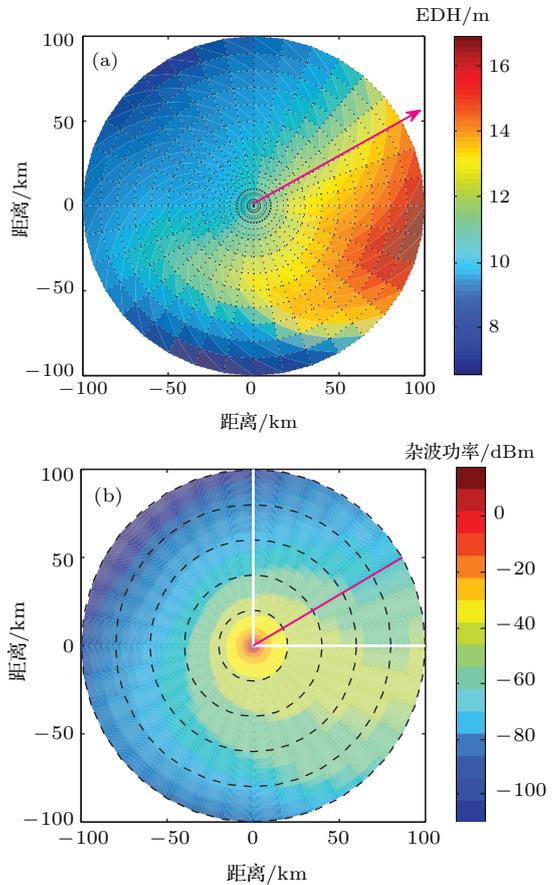


图6 (网刊彩色) 雷达探测范围内的 (a) 蒸发波导高度 (m) 与相应的 (b) 雷达海杂波接收功率 (dBm)

Fig. 6. (color online) (a) Evaporation duct height (m) and (b) corresponding radar clutter power within the radar coverage.

图5给出了2011年6月1日世界时(UTC) 12时, 使用MM5数值预报模型预报的未来12 h我国东海部分海域的蒸发波导高度区域分布. 假设雷达位于图中红色圆点处(28.0°N, 124.9°E), 则100 km的探测范围对应的区域如图5中的圆形所示. 为了

便于在波导反演中使用, 将该区域内的蒸发波导高度画成极坐标的形式, 如图 6(a) 所示. 图 6 中以正东方向为 0° 方位角, 方位角按逆时针方向增大, 箭头表示方位角为 30° 的雷达探测方向. 在此环境中, 假设雷达系统参数如表 1 所列, 根据基于抛物方程的对流层电波传播理论正演模拟的雷达海杂波接收功率如图 6(b) 所示. 从图 6(b) 可以看出, 杂波功率随距离的增大而逐渐减小, 由于蒸发波导高度较低, 由电波弹跳引起的杂波干涉增强与减弱现象不明显. 此外, 杂波功率-距离分布随方位角不断变化, 这是由不同方位向上的蒸发波导高度水平非均匀性引起的, 这种不同方位向上杂波功率的差异, 保证了区域性蒸发波导反演的可行性.

为了模拟伪实测的雷达海杂波接收功率, 本文在图 6(b) 给出的正演模拟杂波功率上添加了零均值高斯白噪声, 噪声水平使用 10 km 处的杂噪比表示, 设为 30 dB. 由于 MM5 的预报结果只包括蒸发波导高度一个参数, 因此本文使用单参数的

Paulus-Jeske 模型对蒸发波导垂直 M 剖面进行建模, M 剖面的水平非均匀性使用蒸发波导高度水平变化特征的前 3 个主分量表示, 即利用 3 个波导高度主分量系数对水平非均匀性建模.

表 1 区域非均匀蒸发波导反演使用的雷达系统参数
Table 1. Radar parameters for the regional range-dependent evaporation duct inversion.

参数	值
频率/MHz	10000.0
功率/dBm	80.0
天线增益/dB	44.0
天线高度/m	5.0
天线仰角/ $^\circ$	0.0
波束宽度/ $^\circ$	0.7
天线类型	高斯
极化方式	VV

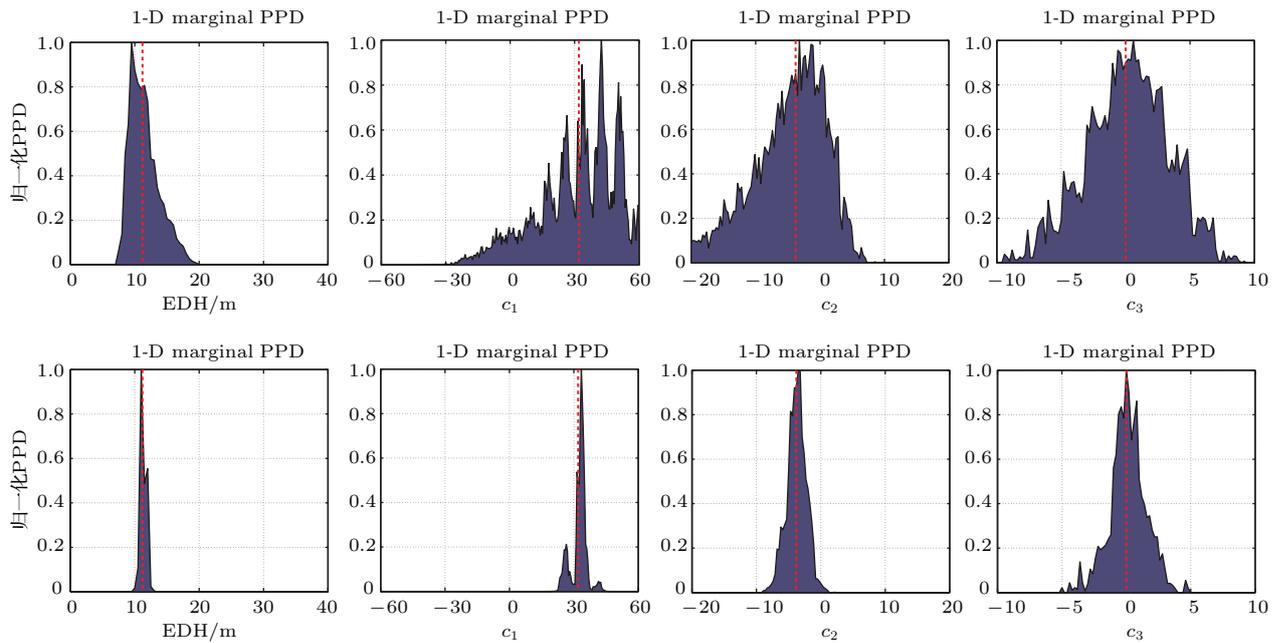


图 7 (网刊彩色) 不含数值预报先验信息 (第一行) 与含数值预报先验信息 (第二行) 时反演的蒸发波导高度及其主分量系数 (c_1, c_2, c_3) 的一维边缘后验概率密度分布

Fig. 7. (color online) One-dimensional marginal posterior probability density of the evaporation duct height and its principle component coefficients inverted (the first line) without and (the second line) with the prior duct information from numerical predictions.

使用本文区域性非均匀蒸发波导的贝叶斯后验概率估计模型, 反演得到的方位角为 340° 路径上蒸发波导高度 EDH 及其 3 个主分量系数的归一化一维边缘后验概率密度 PPD 分布如图 7 所示. 第

一行与第二行代表不含和含历史数值预报先验信息时的结果. 在利用历史数值预报结果构造蒸发波导高度先验概率密度时 ((24) 式), 标准差设为 2 m. (23) 式中实测杂波功率的误差方差 ν 取为 9 dB².

图中的垂直红色虚线表示通过方位角 340° 路径上的实际非均匀蒸发波导高度(图5 预报结果)拟合的4个剖面参数的真实值, 分别为 $EDH^r = 11.2 \text{ m}$, $c_1^r = 32.0$, $c_2^r = -3.8$, $c_3^r = 0$. 从图7可以看出, 含历史数值预报先验信息时本文反演模型得出的最大后验概率估计解比不含先验信息时更为准确, 与真实值符合得更好, 说明含先验信息情况下可以得到波导剖面参数的更准确点估计. 而且, 通过比较两种情况下的后验概率分布可以发现, 含历史数值预报先验信息时, 4个参数的后验概率分布方差较小, 说明反演得到真实值的概率较大, 相对地反演得到偏离真实值的波导参数的概率较小. 即通过引入历史数值预报先验信息, 使得参数反演结果的不确定性变小, 可信度升高. 另外, 从图7还可以看出, 蒸发波导高度主分量系数 c_1 的后验概率密度具有多个局部极大值, 这使得反演具有多个可能的解, 而通过引入历史数值预报先验信息, 错误的局部极大值被剔除, 较容易获得正确的最大后验概率估计解.

图8给出了方位角为 340° 的方位向上, 利用4个波导参数的最大后验概率估计解(图7)构建的水平非均匀蒸发波导高度与真实波导高度的比较. 从图8可以看出, 由于不含先验信息情况下主分量系数 c_1 的最大后验概率估计解的误差较大(图7), 使得反演的蒸发波导高度与真实波导高度有明显的偏差, 而在引入先验信息之后, 反演结果的质量大幅提升. 不含先验信息时该方位向上的波导参数反演的误差较大, 这是由于当蒸发波导高度在该方位向的真实非均匀蒸发波导高度附近变化时雷达海杂波功率的变化不敏感造成的, 在这种情况下,

历史数值预报先验信息的引入将明显提高波导参数的反演质量. 这从侧面说明历史数值预报先验信息在波导反演中起到的作用程度随真实波导环境的变化而变化.

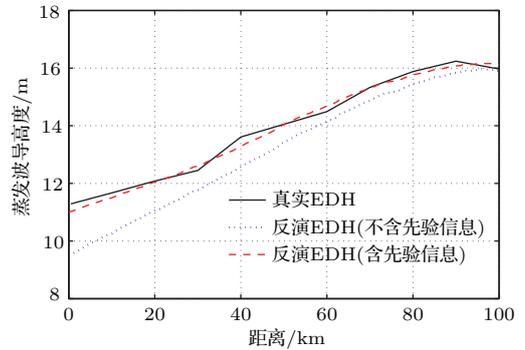


图8 (网刊彩色) 含与不含历史数值预报先验信息时反演的非均匀蒸发波导高度与真实波导高度比较

Fig. 8. (color online) Comparison of the real range-dependent evaporation duct height and the height inverted with and without the prior duct information from numerical predictions.

图9和图10分别给出了在不含历史数值预报先验信息与含历史数值预报先验信息两种情况下, 使用本文贝叶斯后验概率估计模型反演的整个雷达探测范围内的区域性非均匀蒸发波导高度分布及其反演误差. 通过与图6给出的实际蒸发波导高度区域分布对比并统计可知, 两种情况下反演的平均误差分别为0.30和0.17 m, 说明含数值预报先验信息时波导高度区域分布的反演精度更高, 反演误差减小了43%. 两种情况下的反演精度在方位向 280° 到 350° 的区域内体现得更为明显, 在该区域内, 两种情况下反演的蒸发波导高度平均误差分别为0.81和0.28 m, 反演误差减小了65%.

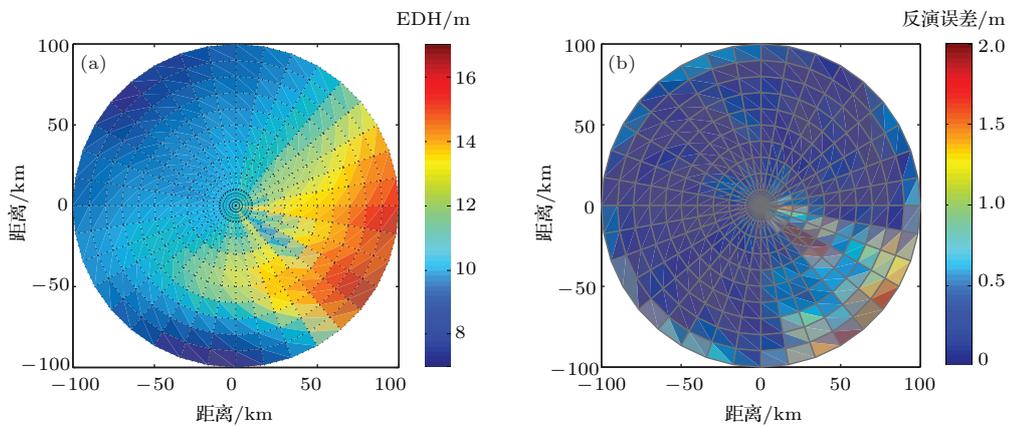


图9 (网刊彩色) 不含历史数值预报先验信息时反演的区域性非均匀 (a) 蒸发波导高度及 (b) 反演误差

Fig. 9. (color online) Regional range-dependent (a) evaporation duct height and (b) its corresponding error inverted without the prior duct information from numerical predictions.

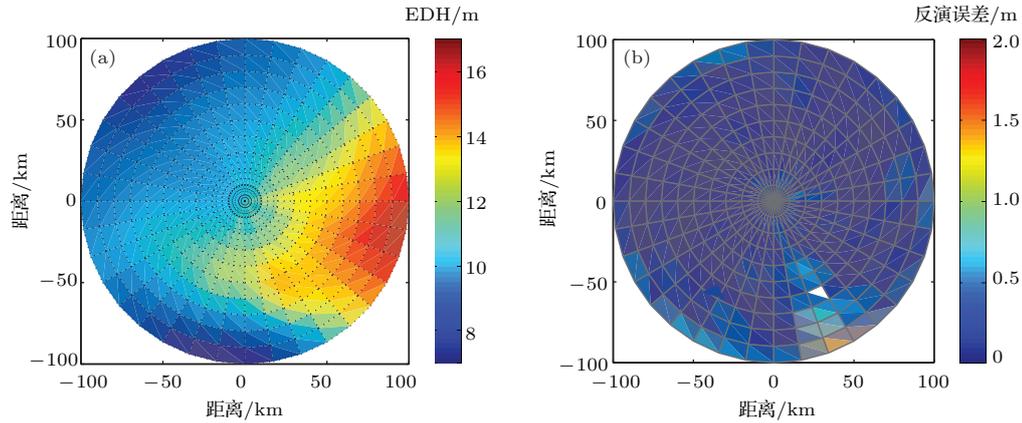


图 10 (网刊彩色) 含历史数值预报先验信息时反演的区域性非均匀 (a) 蒸发波导高度及 (b) 反演误差

Fig. 10. (color online) Regional range-dependent (a) evaporation duct height and (b) its corresponding error inverted with the prior duct information from numerical predictions.

综上所述, 通过将蒸发波导历史数值预报的结果作为先验信息, 利用本文提出的贝叶斯后验概率估计模型有效地提高了雷达海杂波反演蒸发波导的性能与精度, 实现了海上区域性非均匀蒸发波导的数值预报技术与雷达海杂波反演技术的有效融合.

5 结 论

考虑到实际海洋环境中蒸发波导的区域非均匀性严重影响电波传播损耗的空间分布, 本文将中尺度数值气象模式 MM5 预报的区域性蒸发波导 M 剖面作为先验信息, 提出了一种含该先验信息的区域性非均匀蒸发波导的雷达海杂波后验概率估计模型, 实现了基于雷达海杂波和数值预报融合性反演技术的蒸发波导区域非均匀特性反演. 通过我国东海海域的实际区域非均匀蒸发波导反演测试, 表明该模型通过将蒸发波导历史数值预报的结果作为先验信息, 能够得到比单纯使用雷达海杂波反演技术更准确的蒸发波导 M 剖面参数点估计, 且估计结果的后验概率分布方差较小, 即反演不确定性减小. 本文的区域性蒸发波导反演是通过分别反演各方位向上的水平非均匀 M 剖面, 然后对各方位向进行融合来获得区域性非均匀蒸发波导 M 剖面结构. 下一步可以研究蒸发波导方位向不均匀性的主分量提取方式, 实现全方位区域性非均匀蒸发波导的同时反演.

参考文献

[1] Reilly J P, Dockery G D 1990 *IEE Proc. -Radar Signal Process* **137** 80

[2] Zhao X F, Huang S X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 099204 (in Chinese) [赵小峰, 黄思训 2013 物理学报 **62** 099204]

[3] Feng J, Liao C, Zhang Q H, Sheng N, Zhou H J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 134101 (in Chinese) [冯菊, 廖成, 张青洪, 盛楠, 周海京 2014 物理学报 **63** 134101]

[4] Yardim C 2007 *Ph. D. Dissertation* (San Diego: University of California)

[5] Goldhirsh J, Dockery G D 1998 *Radio Sci.* **33** 239

[6] Liu A G, Cha H, Liu F 2007 *Chin. J. Radio Sci.* **22** 867 (in Chinese) [刘爱国, 察豪, 刘峰 2007 电波科学学报 **22** 867]

[7] Douvenot R, Fabbro V, Gerstoft P, Bourlier C, Saillard J 2010 *Radio Sci.* **45** RS1007

[8] Karimian A, Yardim C, Gerstoft P, Hodgkiss W S, Barrios A E 2011 *Radio Sci.* **46** RS6013

[9] Karimian A, Yardim C, Hodgkiss W S, Gerstoft P, Barrios A E 2012 *Radio Sci.* **47** RS0M07

[10] Rogers L T, Hattan C P, Stapleton J K 2000 *Radio Sci.* **35** 955

[11] Gerstoft P, Rogers L T, Krolik J L, Hodgkiss W S 2003 *Radio Sci.* **38** 8053

[12] Yardim C, Gerstoft P, Hodgkiss W S 2006 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **54** 1318

[13] Sheng Z, Huang S X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1734 (in Chinese) [盛峥, 黄思训 2010 物理学报 **59** 1734]

[14] Zhao X F, Huang S X 2014 *J. Atmos. Oceanic Technol.* **31** 1250

[15] Zhao X F, Huang S X 2011 *Chin. Phys. B* **20** 029201

[16] Zhao X F, Huang S X, Xiang J 2011 *Chin. Phys. B* **20** 099201

[17] Jiao L, Zhang Y G 2009 *Acta Meteorol. Sin.* **67** 382 (in Chinese) [焦林, 张永刚 2009 气象学报 **67** 382]

[18] Chen L, Gao S H, Kang S F, Wu Z M 2011 *Periodical of Ocean University of China* **41** 1 (in Chinese) [陈莉, 高山红, 康士峰, 吴增茂 2011 中国海洋大学学报 **41** 1]

[19] Paulus R A 1990 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **38** 1765

[20] Miller F P, Vandome A F, McBrewster J 2010 *Karhunen-Loeve Theorem* (Beau Bassin: Alphascript Publishing)

[21] Levy M F 2000 *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation* (London: The Institution of Electrical Engineers)

[22] Zhang J P, Wu Z S, Wang B 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 034301

[23] Sheng Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 029302

Inversion of regional range-dependent evaporation duct from radar sea clutter*

Zhang Jin-Peng^{1)†} Zhang Yu-Shi¹⁾ Wu Zhen-Sen²⁾ Zhang Yu-Sheng¹⁾ Hu Rong-Xu²⁾

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

2) (School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 2 December 2014; revised manuscript received 19 December 2014)

Abstract

Because the weather conditions in different sea areas are different, the evaporation duct occurring over a large sea surface is normally regional and range-dependent. This property results in the fact that the radio wave propagation within the environment of this type is distinct from that within the range-independent evaporation duct environment. Therefore, it is meaningful to perform the regional range-dependent evaporation duct inversion for accurately predicting radio wave propagation and improving radar performance. From among the variety of ways of detecting evaporation duct in practical application, we adopt the regional modified refractivity profile of evaporation duct predicted by the mesoscale numerical weather model MM5 as the prior information, and propose a posterior probability estimation model of the regional range-dependent evaporation duct on the basis of the radar sea clutter power. First, in this model we use the principal component analysis method to model the range-dependent property of evaporation duct, and on this basis, establish the inversion procedure of the range-dependent evaporation duct by using the radar sea clutter. Then, we obtain the relationship among prior probability distribution, posterior probability distribution, and likelihood function of the parameters of the modified refractivity profile by using the Bayesian theory, and finally realize the maximum posterior probability estimation of the evaporation duct parameters. By estimating the real regional range-dependent evaporation duct over East China Sea, it is indicated that the proposed model can perform the inversion of regional range-dependent evaporation duct with a higher precision.

Keywords: radar sea clutter, evaporation duct, range-dependent, inversion method

PACS: 41.20.Jb, 43.28.We

DOI: 10.7498/aps.64.124101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41175012, 41205024, 41305024).

† Corresponding author. E-mail: zhjinpeng@hotmail.com