

## 遗传算法结合正则化方法反演海洋大气波导\*

何然 黄思训<sup>†</sup> 周晨腾 姜祝辉

(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

(2011年8月29日收到; 2011年10月24日收到修改稿)

针对正则化方法在解决实际反演问题时既能克服问题的不稳定性又可以很大程度上抑制噪声和误差的传播, 本文提出了利用遗传算法结合正则化方法的新算法, 在遗传算法适应度函数中引入正则化项来反演波导参数; 然后对算法进行仿真试验, 结果表明新算法与传统遗传算法相比具有较高的反演精度, 并指出当噪声误差小于 10% 时, 算法具有较强的“去噪”性能; 最后利用机载雷达在 Wallops 岛探测的海表面处局部回波资料进行反演试验, 将反演结果与实测大气折射率廓线进行比较, 说明该算法的有效性. 新方法为海洋大气波导反演研究提供了一种新思路.

**关键词:** 遗传算法, 正则化, 反演, 大气波导

**PACS:** 92. 60. Ta

## 1 引言

利用雷达回波信息反演大气波导一直是国内外关注的热点, 早在 1998 年海军水面战争中心 (NSWC) 首次提出利用雷达探测的海杂波信息对大气折射结构进行预估计 (Refractivity from Clutter, RFC)<sup>[1]</sup>. 之后, Gerstoft 和 Yardim 等人分别利用了遗传算法 (GA)<sup>[2]</sup>, 贝叶斯-马尔可夫链蒙特卡罗 (Bayesian-MCMC) 算法<sup>[3]</sup>, 序列重要抽样算法<sup>[4]</sup> 和卡尔曼滤波法<sup>[5]</sup> 对雷达回波局部观测资料进行了相关的大气波导反演试验. 黄思训、赵小峰和盛峥在国外研究的基础上对反演算法进行改进与创新, 结合雷达仿真整体观测资料提出了利用变分伴随结合正则化<sup>[6-11]</sup> 等方法用于大气波导参数反演研究, 改善了反演时间和精度.

近几十年来, Tikhonov 正则化方法 (Tikhonov regularization method) 在反问题研究中发挥了重要作用, 在解决实际问题时既能克服问题的不稳定性又可以很大程度上抑制噪声和误差的传播. 本文提出利用遗传算法结合正则化方法 (modified genetic algorithm with tikhonov regularization method, MGAT) 的新算法对大气波导反演进行研究, 将新

算法用于仿真和实测资料的反演试验, 并对反演结果进行讨论分析, 结果表明了该算法的有效性, 新算法拓宽了海洋大气波导反演研究的思路.

## 2 抛物型波方程模式

美国海军物理实验室提出了一种经典普适性的五参数模型<sup>[2]</sup> 用于描述实际应用中的各种大气波导, 可用矢量  $\mathbf{m}$  表示为

$$\mathbf{m} = (M_d, z_{\text{thick}}, c_1, z_b, \delta)^T, \quad (1)$$

矢量  $\mathbf{m}$  中的五个参数分别表示为: 表面波导对应的负折射指数  $M_d$  (M-deficit); 表面波导陷获层的厚度  $z_{\text{thick}}$  (thickness); 混合层的斜率  $c_1$  (mixed layer slope); 表面波导陷获层底的高度  $z_b$  (base height); 蒸发波导厚度  $\delta$  (evaporation duct height), 具体形式如图 1 所示.

五参数模型对应的大气折射率廓线垂直分布和各参数边界条件设置详见文献 [2]. 当五参数模型中蒸发波导高度  $\delta$  为零时, 可利用四参数模型  $\mathbf{m} = (M_d, z_{\text{thick}}, c_1, z_b)^T$  反演波导参数.

描述电磁波在实际大气中传播的抛物型波方程<sup>[9]</sup> 可表示为

\* 国家自然科学基金 (批准号:41175025) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: huangxp@yahoo.com.cn

$$\frac{\partial^2 U(x, z)}{\partial z^2} + 2ik_0 \frac{\partial U(x, z)}{\partial x} + k_0^2(m^2 - 1)U(x, z) = 0, \quad (2)$$

式中  $x$  和  $z$  分别表示地球表面的水平距离和垂直高度;  $k_0$  表示自由空间中的波数,  $U(x, z)$  表示电磁场强;  $m$  表示大气修正折射率. 利用分步傅里叶变换<sup>[12]</sup>, 在得到  $x = x_0$  处场强值  $U(x_0, z)$  后, 结合分步向前法<sup>[12]</sup> 可求出  $x > x_0$  各点的场量值  $U(x, z)$ , 通过场量值  $U(x, z)$  求出方向图传播因子  $Q = \sqrt{x} |U(x, z)|$ , 然后可得到单程传播损耗  $L(\mathbf{m})$  如下:

$$L(\mathbf{m}) = 20 \lg \left( \frac{4\pi x}{\lambda} \right) - 20 \lg(Q), \quad (3)$$

其中  $\lambda$  表示电磁波的波长,  $\mathbf{m}$  表示矢量对应的波导参数.

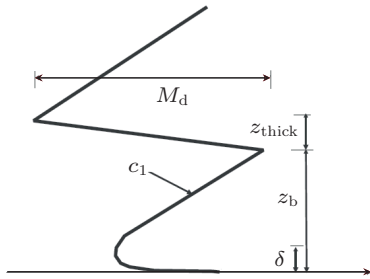


图1 经验五参数模型<sup>[2]</sup>

### 3 MGAT 算法

Tikhonov 正则化方法的应用随着反问题的发展而逐渐兴起, 利用遗传算法结合正则化方法, 构建合理的正则化泛函、选择有效正则化参数可以有效地消除反问题中不适定性所造成的求解困难, 很大程度上地抑制噪声和误差的传播. 传统遗传算法 (GA) 优点在于能够只要确定目标函数以及搜索空间, 就可以对复杂问题进行求解, 具有很强的实用性. 它的缺点在于全局搜索的时间过慢, 在搜过工作最初阶段, 能够迅速找到收敛值, 陷入局部收敛, 接近精确值时搜索速度明显降低, 导致无法获取全局的最优解. MGAT 算法对传统遗传算法进行了如下改进.

设定初始目标泛函  $J_0[\mathbf{m}]$  表示如下:

$$J_0[\mathbf{m}] = \int_0^S \int_0^H [L^{\text{obs}}(\mathbf{m}^{\text{obs}}) - L^{\text{inv}}(\mathbf{m}^{\text{inv}})]^2 \times dz dx, \quad (4)$$

其中  $S$  和  $H$  分别表示搜索空间的水平距离和垂直高度;  $\mathbf{m}^{\text{obs}}$  表示给定的一组大气波导参数, 将  $\mathbf{m}^{\text{obs}}$  作为观测大气折射廓线,  $L^{\text{obs}}(\mathbf{m}^{\text{obs}})$  表示观测廓线对应的传播损耗;  $\mathbf{m}^{\text{inv}}$  表示反演计算得到的大气折射廓线, 同理可知,  $L^{\text{inv}}(\mathbf{m}^{\text{inv}})$  表示反演廓线对应的传播损耗.  $J_0[\mathbf{m}]$  的值越小, 说明反演计算得到的大气折射廓线精度越高, 越近观测值. 在目标泛函中引入正则化项  $J_1$ , 正则化项  $J_1$  的表达式如下:

$$J_1 = \frac{1}{2} \int_0^S \int_0^H \left| \frac{\partial U(x, z)}{\partial z} \right|^2 dz dx, \quad (5)$$

该项为稳定泛函, 既可以克服问题的不适定性, 又可以消除解的振荡现象. 此时将目标泛函改写成

$$J = J_0[\mathbf{m}] + \gamma J_1 = J_0[\mathbf{m}] + \frac{\gamma}{2} \int_0^S \int_0^H \left| \frac{\partial U(x, z)}{\partial z} \right|^2 dz dx, \quad (6)$$

其中  $\gamma$  表示正则化参数<sup>[13]</sup>, 求解大气波导的反演问题可以转化为求解目标泛函  $J$  的最小值.

设置的搜索空间网格点数为  $N$ , 由于目标泛函  $J$  较大, 可将适应度函数  $\varphi_{\text{fit}}$  设计为

$$\varphi_{\text{fit}}[\mathbf{m}] = \frac{1}{1 + \sqrt{J/N}}. \quad (7)$$

这样设计可以保证适应度值在 0 到 1 之间, 适应度  $\varphi_{\text{fit}}$  越接近于 1, 说明反演结果越接近观测值, 反演精度越高.

### 4 仿真试验

#### 4.1 参数设置及传播损耗计算

表 1 中给出两组仿真数据, 其中  $\mathbf{m}_1 = (M_d, z_{\text{thick}}, c_1, z_b, \delta)^T$  为五参数模型,  $\mathbf{m}_2 = (M_d, z_{\text{thick}}, c_1, z_b)^T$  为四参数模型. 两组参数分别对应的是混合波导和表面波导.

表 1 两组大气波导参数

	$M_d/M$	$z_{\text{thick}}/m$	$c_1/(M/m)$	$z_b/m$	$\delta/m$
$\mathbf{m}_1$	30	50	0.13	160	25
$\mathbf{m}_2$	40	40	0.20	160	—

设雷达工作频率为 7 GHz, 天线架设高度 18 m, 天线极化特性为水平极化. 根据上述系统参数设置, 结合参数模型得到大气折射率廓线的垂直分布,

计算电磁波在两种波导环境下的传播损耗  $L(m)$ , 如图 2 和图 3 所示. 图 2(a) 和 3(a) 中横坐标表示大气修正折射指数, 单位 M; 纵坐标表示垂直高度, 单位 m. 图 2(b) 和 3(b) 中横坐标表示水平距离, 单位 km; 纵坐标表示垂直高度, 单位 m; 灰度索引表示电磁波单程传播损耗, 单位 dB.

### 4.2 MGAT 算法与 GA 算法反演结果对比

将 4.1 中计算得到的传播损耗  $L(m)$  作为仿真观测值, 分别结合 MGAT 和 GA 算法反演两组波导参数, 将反演结果与标准值作比较, 得出相关结论. 其中 GA 算法见文献 [14].

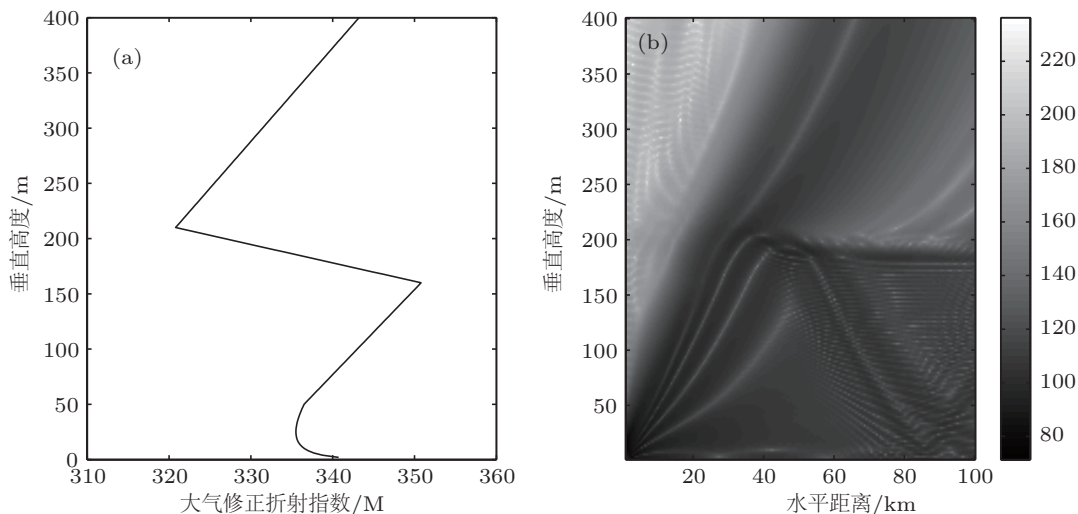


图 2 (a) 大气修正折射指数垂直分布; (b) 电磁波单程传播损耗空间分布

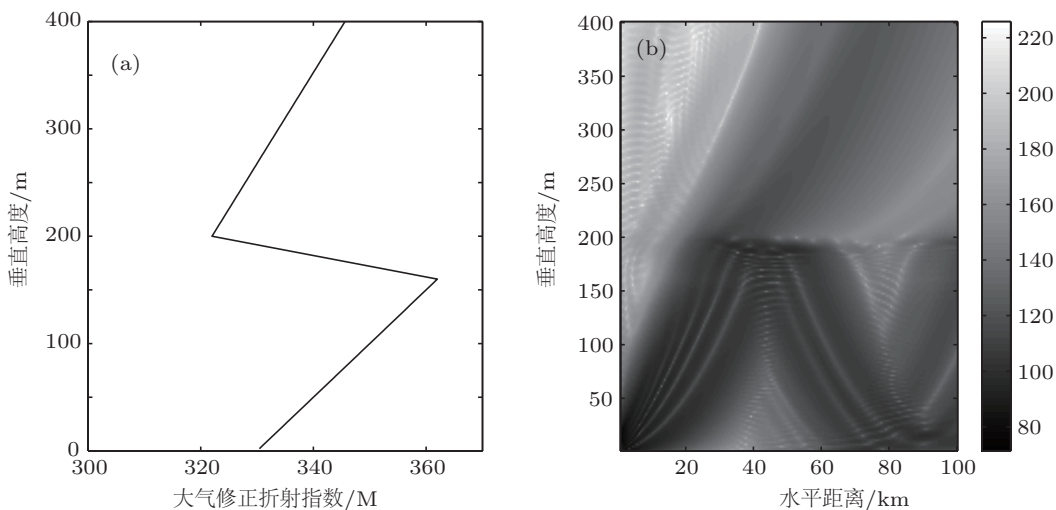


图 3 (a) 大气修正折射指数垂直分布; (b) 电磁波单程传播损耗空间分布

表 2 两种算法反演结果比较

	第一组参数			第二组参数		
	标准值	GA1000 代	MGAT1000 代	标准值	GA1000 代	MGAT1000 代
$M_d/M$	30	24.145	31.769	40	37.146	39.280
$z_{thick}/m$	50	16.520	54.936	40	37.048	41.762
$c_1/(M/m)$	0.13	0.057	0.151	0.2	0.150	0.203
$z_b/m$	160	181.839	156.864	160	139.721	157.921
$\delta/m$	25	20.450	25.650	—	—	—

MGAT 算法相关参数设定如下: 种群大小 30, 染色体长度 40, 交叉率 0.7, 变异率 0.03, 蔓延变异率 0.15, 最大进化代数 1000 代. 仿真试验过程中由于已知真实数据, 根据  $L$  曲线法<sup>[13]</sup> 调整正则化参数,  $\gamma$  取 0.005. 图 4(a) 和 5(a) 表示两种波导环境中大气折射率廓线反演结果与标准值的对比. 其中横

坐标表示大气修正折射指数, 单位  $M$ ; 纵坐标表示垂直高度, 单位  $m$ . 图 4(b) 和 5(b) 表示两种波导环境中高度 200  $m$  处电磁波传播损耗反演结果与标准值的对比. 其中横坐标表示水平距离, 单位  $km$ ; 纵坐标表示传播损耗, 单位  $dB$ . 两种算法的反演结果比较详见表 2.

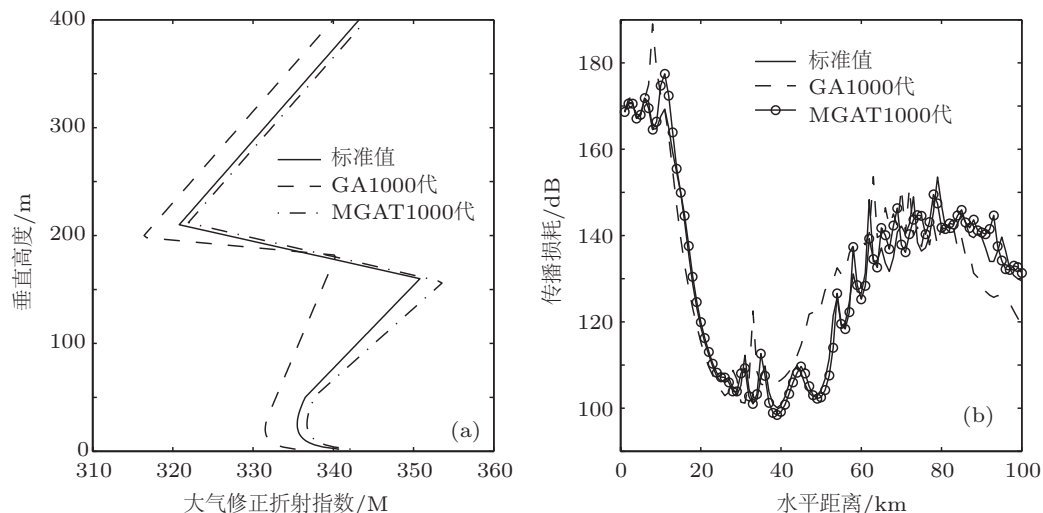


图 4 混合波导环境中反演结果与标准值的对比图

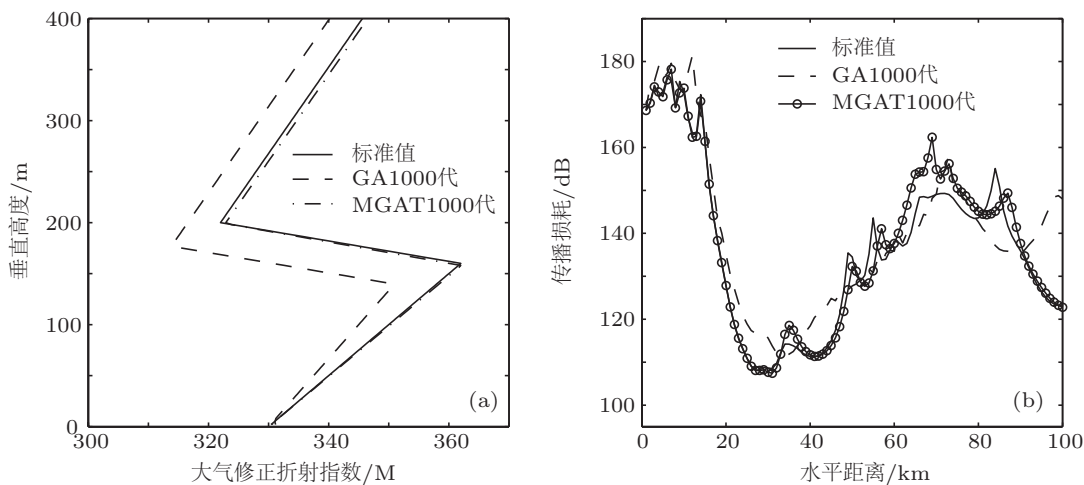


图 5 表面波导环境中反演结果与标准值的对比图

根据图表给出的结果可以发现: 在混合波导环境下, MGAT 算法对混合层斜率  $c_1$  的反演精度比较敏感, 但是与标准值相比误差较小, 对其余四个参数具有较高的反演精度; 反演得到的大气折射率廓线与标准廓线之间的误差在  $1 M$  以内; 传播损耗反演结果较好, 但在  $10 km$  处与标准值之间有  $10 dB$  误差. GA 算法反演混合层斜率  $c_1$ 、陷获层厚度  $z_{thick}$  和陷获层底高度  $z_b$  这三个参数时都

显得比较敏感; 反演得到的大气折射率廓线与标准廓线之间的误差在  $5 M$  以上. 在表面波导环境下, MGAT 算法的反演精度非常高, 反演得到的大气折射率廓线与标准廓线几乎重合. GA 算法除了对混合层斜率  $c_1$  和陷获层底高度  $z_b$  的反演精度显得较敏感, 对其余参数反演都有不错的反演精度; 反演得到的大气折射率廓线与标准廓线之间的平均误差接近  $10 M$ ; 传播损耗反演结果与标准值之间的

误差随传播距离的增加而逐渐增大.

综上所述, MGAT 算法反演精度优于 GA 算法,

可以考虑用 MGAT 算法代替 GA 算法进行大气波导参数反演研究.

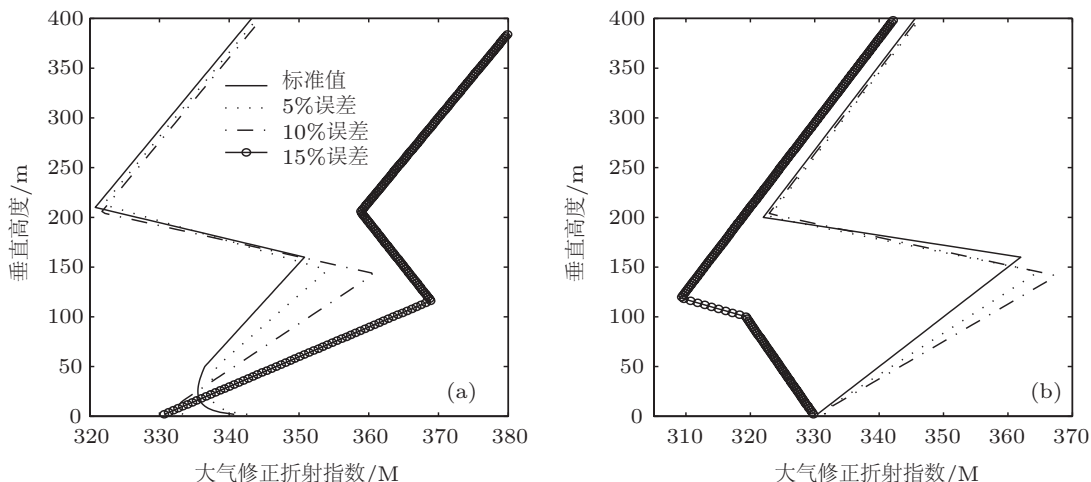


图 6 不同噪声误差条件下, 大气折射率廓线反演结果与标准值的对比图

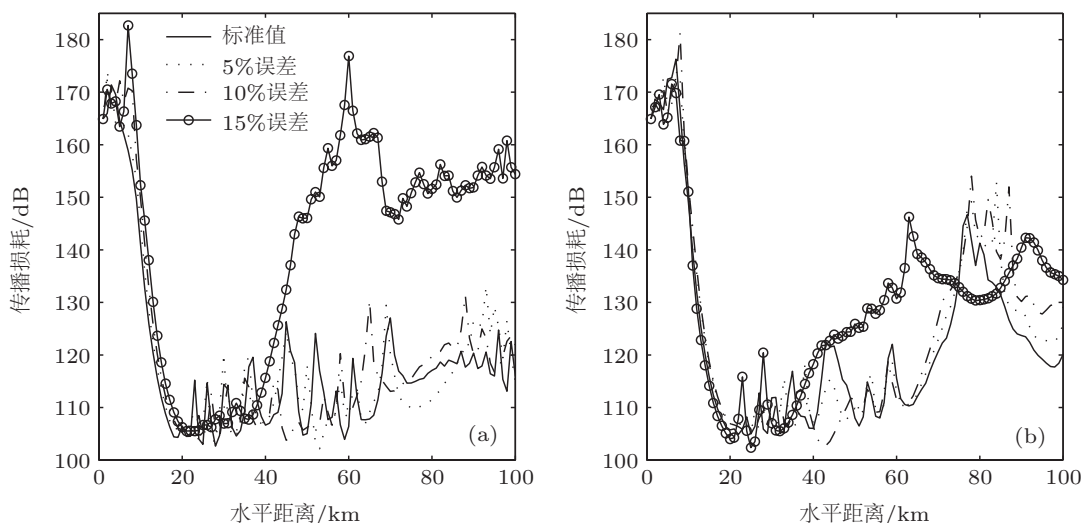


图 7 不同噪声误差条件下, 高度 150 m 处传播损耗反演结果与标准值的对比图

### 5 MGAT 算法“去噪性”分析

在解决实际大气波导反问题 (RFC) 时, 雷达探测到的海杂波中含有大量噪声信息, 因此是否具有良好的“去噪”能力是检验算法反演性能强弱的一个重要指标. 本节在表 1 对应的两种典型波导环境中分别添加 5%, 10% 和 15% 的高斯噪声误差, 根据噪声条件下的反演结果分析 MGAT 算法的“去噪性”.

图 6 和图 7 表示不同噪声误差条件下, 利用 MGAT 算法反演得到的大气折射率廓线和电磁波传播损耗. 具体反演结果以及与标准值的对比

参照表 3 和表 4.

表 3 不同噪声误差条件下, 混合波导各参数反演结果

	标准值	5% 噪声误差	10% 噪声误差	15% 噪声误差
$M_d/M$	30	32.160	39.198	10.068
$z_{thick}/m$	50	65.885	61.486	89.443
$c_1/(M/m)$	0.13	0.164	0.215	0.335
$z_b/m$	160	147.043	143.384	116.617
$\delta/m$	25	25.298	7.273	0.508

根据图表分析得到以下结论:1)MGAT 算法的反演精度随着噪声误差的增加而降低; 2) 当波导环境中的噪声误差小于 10% 时, MGAT 算法具有较强的“去噪”性能, 反演得到的大气折射率廓线与实际

廓线较符合, 误差范围可以接受; 3) 当波导环境中的噪声误差大于 10% 时, MGAT 算法会丧失的“去噪”性能, 反演得到的大气折射率廓线与实际廓线偏差很大, 反演精度受到严重的影响.

表 4 不同噪声误差条件下, 表面波导各参数反演结果

	标准值	5% 噪声误差	10% 噪声误差	15% 噪声误差
$M_d/M$	40	41.838	44.673	10.068
$z_{thick}/m$	40	55.230	62.463	18.671
$c_1/(M/m)$	0.2	0.164	0.226	-0.107
$z_b/m$	160	145.310	141.266	100.176

## 6 实际雷达回波资料反演试验

通过以上分析, 可以发现 MGAT 算法在仿真资料试验中具有较强的反演精度与“去噪”能力, 结合实际雷达回波资料, 进一步检验算法的可行性.

实际资料进行反演试验时, 不可能得到整个空间区域内的传播损耗值, 因此只能利用海表面处雷达接收到的实际回波功率进行波导参数反演. 根据文献 [2] 可知, 雷达回波功率  $P_c$  的表达式为

$$P_c = -2L(\mathbf{m}) + 10 \lg(r) + \sigma^\circ + C, \quad (8)$$

式中  $L(\mathbf{m})$  表示电磁波传播损耗,  $r$  表示传播距离,  $\sigma^\circ$  表示归一化散射系数,  $C$  表示与雷达相关参数的常量.

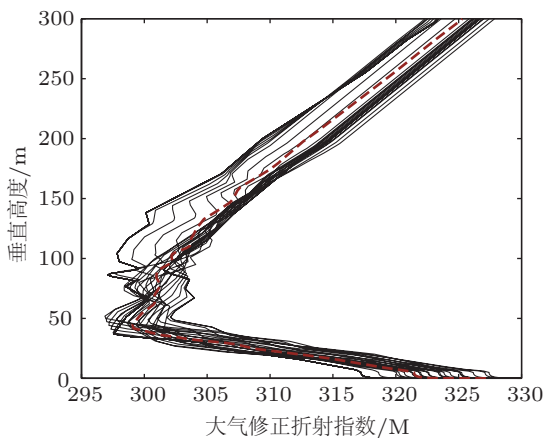


图 8 实测大气廓线垂直分布

本文采用的雷达回波资料为 1998 年美国海军水面战争中心在 Wallops 岛进行的探测资料 [3], 进行该探测的雷达为空间测距雷达, 具体参数设置如文献 [2]. 该资料在水平距离 60 km 内包含有 32 条

件折射率廓线, 其中实线表示实测 32 条廓线, 虚线表示 32 条廓线的平均值, 如图 8 所示.

由图 8 可知, 这 32 条廓线之间的误差不大, 基本在 5 M 以内. 美国学者 Barrios 在 1991 年发表的国防报告中表明 [15], 当观测环境未出现强对流等天气现象时, 海洋大气环境局部范围内可近似看作为水平均匀环境. 因此, 本节根据实际计算需要, 可将上述实测资料环境近似为水平均匀环境, 取 32 条廓线的平均值作为实测廓线.

将海表面  $H_0$  处雷达实际接收的回波功率记为观测值  $P_c^{obs}$ , 反演得到的大气折射率廓线对应的雷达回波功率记为反演值  $P_c^{inv}$ , 结合正则化方法设置目标泛函  $J$  如下:

$$J = J_0 + \gamma J_1$$

$$= \int_{S_0}^S (P_c^{obs} - P_c^{inv})^2 \Big|_{z=H_0} dx$$

$$+ \frac{\gamma}{2} \int_{S_0}^S \int_0^{H_0} \left| \frac{\partial U(x, z)}{\partial z} \right|^2 dz dx, \quad (9)$$

式中的  $J_1$  表示正则化项;  $S_0$  表示初始距离. 由于采样点不足造成了局部资料的权重因子发生改变, 因此正则化参数  $\gamma$  需要进行调整, 分析  $\gamma$  的取值范围在  $10^{-3}$  左右, 本节取  $\gamma = 0.001$ . 根据设定的目标泛函, 采用 MGAT 算法对实际雷达回波资料进行反演.

图 9(a) 给出海表面 10 km 到 60 km 传播距离内雷达接收到的回波功率, 图 9(b) 中实线表示实测大气折射率廓线, 点划线表示 MGAT 算法反演得到的廓线. 通过对比可以发现, 将 MGAT 算法应用到实测资料反演也具有较好的精度, 误差基本控制在 5 M 以内.

根据图 9 给出的实测廓线和反演廓线, 分析对应的电磁波传播环境特征, 如图 10 所示, (a) 表示实测廓线条件下的电磁波单程传播损耗; (b) 表示反演廓线条件下的电磁波单程传播损耗; (c) 表示上述两者之间的传播损耗误差空间分布. (a), (b) 和 (c) 中的横坐标表示水平距离, 单位 km; 纵坐标表示垂直高度, 单位 m; 灰度索引表示传播损耗, 单位 dB.

通过图 9 和图 10 给出的结果可以发现: MGAT 算法反演得到的廓线和实测廓线存在一定的误差, 但大致能够反映波导层结构特征; 反演廓线对应的传播损耗与实际传播损耗之间的误差基本在 40 dB 以内, 说明反演廓线基本能够描述电磁波在波导环

境中的传播特征信息,也证明了将海洋大气局部环境近似为水平均匀是合理的.

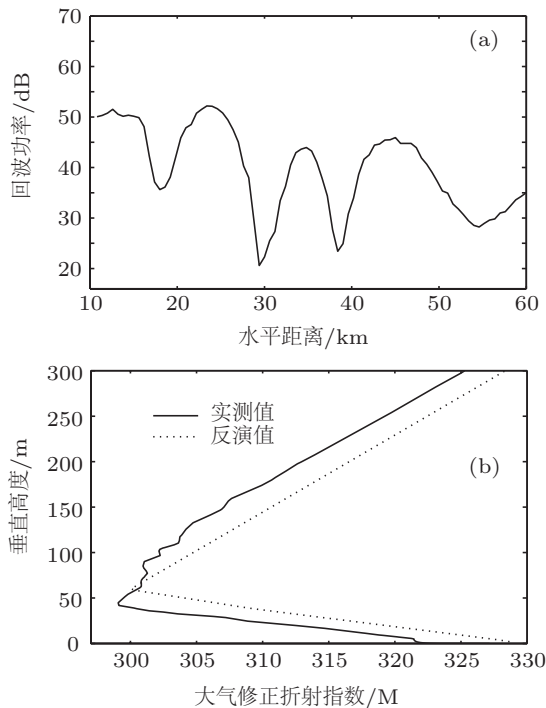


图9 (a) 实测雷达回波功率; (b) 大气折射率廓线垂直分布

Douvenot 在文献[16]中得出如下结论: 利用雷达回波资料反演大气折射率廓线(RFC)的主要目的并不是要得到一条精准的大气折射率廓线,而是得到能够准确描述大气折射环境的相关信息. 依据 Douvenot 的观点, 可以认为 MGAT 算法在 RFC 技术应用中具备可行性.

## 7 结论

正则化方法可以有效地解决反演问题中的不适定性, 很大程度上地抑制噪声和误差的传播. 本文提出利用遗传算法结合正则化方法(MGAT 算

法) 反演波导参数, 得到以下结论:

1. 利用仿真资料进行反演试验时, 结果表明: 零噪声误差条件下, MGAT 算法整体的反演精度高于 GA 算法. 对 MGAT 算法“去噪”能力进行分析, 发现当波导环境中的噪声误差小于 10% 时, MGAT 算法的“去噪”性能较好, 反演得到的大气折射率廓线与标准廓线误差较小, 反演精度可以接受. 当噪声误差大于 10% 时, MGAT 算法的“去噪”性能受到严重影响, 反演得到的大气折射率廓线与标准廓线偏大很大, 算法丧失反演精度.

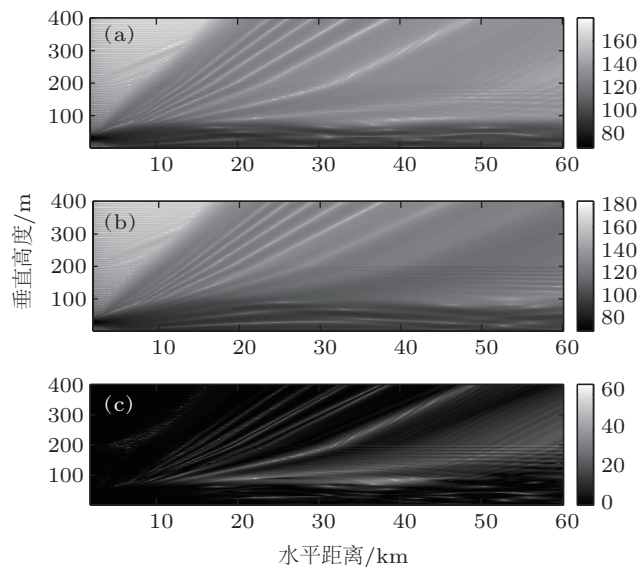


图10 (a) 实测廓线单程传播损耗; (b) 反演廓线单程传播损耗; (c) 传播损耗误差

2. 结合雷达实测局部回波资料反演大气折射率廓线, 结果表明 MGAT 算法反演得到的廓线与实测廓线的误差在正常范围内, 能够大致反映实际波导层结构以及传播特征信息.

因此可以认为将 MGAT 算法应用于海洋大气波导反问题研究是可行的.

- [1] Krolik J L, Tabrikian J 1998 *Proceedings of the 1997 Battlespace Atmospheric Conference*, San Diego CA, SPAWAR Sys Command Tech Republic, March 1998 p635
- [2] Gerstoft P, Rogers L T, Krolik J K, Hodgkiss W S 2003 *Radio Sci.* **38** 8053
- [3] Yardim C, Gerstoft P, Hodgkiss W S 2006 *IEEE Antennas. Propag.* **54** 1318

- [4] Vasudevan S, Anderson R H, Kraut S 2007 *Radio Sci.* **42**
- [5] Yardim C, Gerstoft P, Hodgkiss W S 2008 *IEEE Antennas. Propag.* **56** 1058
- [6] Sheng Z, Huang S X 2010 *Acta Physica Sinica*. **59** 1738 (in Chinese) [盛峥, 黄思训 2010 物理学报 **59** 1738]
- [7] Zhao X F, Huang S X, Sheng Z 2010 *Chin Phys. B* **19** 049201
- [8] Zhao X F, Huang S X 2011 *Chin Phys. B* **20** 029201

- [9] Zhao X F, Huang S X, Du H D 2011 *Radio Sci.* **46** RS1006  
 [10] Zhao X F 2011 *IEEE Antennas. Propag.* (accepted)  
 [11] Zhao X F, Huang S X 2011 *Progress in Electromagnetics Research B* **33** 153  
 [12] Dockery G D 1988 *IEEE Antennas. Propag.* **36** 1464  
 [13] Huang S X 2005 *Mathematical and Physical Problem in Atmospheric Science*(Beijing: China Meteorological Press) p422 (in Chinese)[黄思训 2005 大气科学中的数学物理问题 (北京: 气象出版社) 第 422 页]  
 [14] Sheng Z, Huang S X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4328 (in Chinese)[盛峥, 黄思训 2009 物理学报**58** 4328]  
 [15] Barrios A E 1991 *Radio Wave Propagation in Horizontally Inhomogeneous Environments by Using the Parabolic Equation Method* AD-A 242 082  
 [16] Douvenot R, Fabbro V, Gerstoft P, Bourlier C, Saillard J 2008 *Radio Sci.* **43** RS6005

# Genetic algorithm with regularization method to retrieve ocean atmosphere duct\*

He Ran Huang Si-Xun<sup>†</sup> Zhou Chen-Teng Jiang Zhu-Hui

(*Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China*)

(Received 29 August 2011; revised manuscript received 24 October 2011)

## Abstract

Due to the fact that regularization method can overcome the ill-posed characteristic and obviously suppress noise and errors propagation in practical inverse problem, a new algorithm (genetic algorithm with regularization method) is proposed, combining fitness function of genetic algorithm with regularization term to retrieve ocean duct parameter. Simulation experiments show that retrieval accuracy of the new algorithm is better than that of traditional genetic algorithm. When the noise errors are less than 10%, the noise-immune performance is better. Finally, the inversion result from airborne radar clutter local date of sea surface in the Wallops island is compared with real refractivity profile, pointing out the efficiency of algorithm. The new method provides a new consideration for inverse research of ocean atmosphere duct.

**Keywords:** genetic algorithm, regularization, inversion, atmosphere duct

**PACS:** 92.60.Ta

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41175025).

<sup>†</sup> E-mail: huangsxp@yahoo.com.cn