

变分伴随正则化方法从雷达回波反演海洋波导(II) : 实际反演试验*

盛 峰 黄思训[†]

(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

(2009 年 7 月 31 日收到; 2009 年 11 月 17 日收到修改稿)

在理论推导的基础上, 分别利用模拟和实测的雷达回波资料进行反演试验. 在模拟雷达回波资料反演时, 分别对不引入正则化项和引入正则化项的反演结果进行讨论; 在实际雷达回波资料反演时, 讨论了反演结果对初猜值精度的依赖性, 分别考虑初猜值为经验模型给定时和初猜值为统计反演结果时对最后反演精度的影响. 最后比较了变分伴随正则化方法与传统统计反演算法的优缺点, 指出下一步反演算法的改进方向.

关键词: 海洋波导, 雷达回波, 变分伴随, 正则化

PACC: 4110H, 9265D

1. 引 言

海洋上空大气波导是一种反常的大气现象, 可影响无线电系统的正常工作. 在现代高技术条件下的战争中电磁对抗异常强烈, 争夺战场制电磁权, 就需要尽可能多地认识战场大气环境对电磁波传播的影响, 尽可能准确地把握战场大气环境对敌我双方电子战武器装备作战性能的影响. 近年来, 海洋波导的研究日益受到国内外相关机构和各国军方的重视. 为了能够趋利避害地利用大气波导, 对波导的预报和实时探测已成为当前研究的一个重要课题^[1]. Gossard 和 Strauch^[2] 在 1983 年对波导传播条件下雷达回波实现超视距传播的现象进行了研究, 发现雷达回波的时空变化与大气折射率的时空变化有关, 这为利用雷达回波资料反演大气波导奠定了理论基础. 在此基础上, Krolík 和 Tabrikian^[3] 在 1998 年首次提出利用雷达海杂波资料反演大气折射率廓线. Rogers 和 Hattan^[4] 在 2000 年提出基于海杂波利用非线性最小二乘法估计蒸发波导高度; Gerstoft 等^[5] 在 2003 年利用遗传算法对模拟数据进行了反演试验; Vasudevan 等^[6] 在 2007 年利用序列重要抽样算法从雷达杂波中估计表面波导结构; 文献^[7] 对遗传算法的抗噪能力进行了分析, 然后又

采用贝叶斯-蒙特卡罗方法对该问题进行了研究^[8], 为进一步提高反演速度, 充分利用有限的雷达回波观测资料, 文献^[9] 又提出了最优观测值权重函数的概念.

然而上述的各种反演算法都是基于统计反演算法, 计算量过大是它们的固有缺点. 因此, 在今后的研究工作中要发展物理反演算法以提高反演速度, 而变分伴随正则化方法是一种较好的选择, 在理论推导工作的基础上, 本文分别利用模拟和实测的雷达回波资料进行实际反演试验, 并对反演结果进行讨论分析.

2. 模拟雷达回波资料变分伴随正则化方法的反演结果

为了验证变分伴随正则化方法反演海洋波导参数的可行性及其精度, 在资料完整情况下设计反演的数值实验. 先讨论不引入正则化项时变分伴随方法的反演结果, 然后分析引入正则化项后变分伴随方法的反演结果.

2.1. 不引入正则化项时变分伴随方法的反演结果

在不考虑正则化方法时, 目标泛函中的 J_1 项不存在, 目标泛函直接简化为 J_0 项, 此时泛函梯度和

* 国家自然科学基金(批准号:40775025)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: huangxp@yahoo.com.cn

$g(U)$ 项的表达式也做相应改变, 详细参见文献 [10]. 下面在观测资料完整情况下, 用数值试验来检验不引入正则化项时变分伴随方法反演海洋波导参数的可行性及其精度. 试验过程分为以下四个步骤: 第一步, 选择雷达参数和极化方式. 雷达频率为 2000 MHz; 天线类型为辛克型, 天线增益为 30 dB, 采用水平极化方式, 垂直波束角为 1.5° , 抬升角为 0° , 雷达天线高度为 15 m. 第二步, 选择海洋上空大气折射指数结构. 采用标准大气折射率廓线来模拟垂直大气修正折射指数分布, 且假设与水平距离无关. 第三步, 求解正问题. 利用地形抛物方程模式计算模拟雷达电磁波传播的损耗空间分布, 将该模拟数据作为观测值. 第四步, 反演过程. 在给定初猜值情况下, 利用变分伴随方法反演海洋波导特征参数.

为了验证变分伴随方法反演的精度, 图 1 给出了反演结果与真实值的对比, 其中真实值的表达式为 $m = M_0 + cz$, 其中 m 为修正大气折射指数; M_0 为地面处的修正大气折射指数, 取 $M_0 = 391M$, M 表示大气折射指数单位; c 为标准大气状态下修正大气折射指数的斜率, 这里取 $c = 0.118$; z 为高度, 单位为 m. 初猜值的表达式也为 $m = M_0 + cz$, 只是在初猜值表达式中, $M_0 = 395M$, $c = 0.096$. 从图 1 可以看出, 反演值相对真实值的误差与初猜相比有一定的减小, 说明不引入正则化项时变分伴随方法也能滤除初猜值中的误差, 使反演值向真实值接近, 但对初猜值的改进较小. 从图 1 还可以看出, 不引入正则化项时, 反演值与真实值相比明显存在一种振荡的现象, 这就是以上所提到的不适宜现象, 这个问题将在下面通过引入正则化约束项来解决.

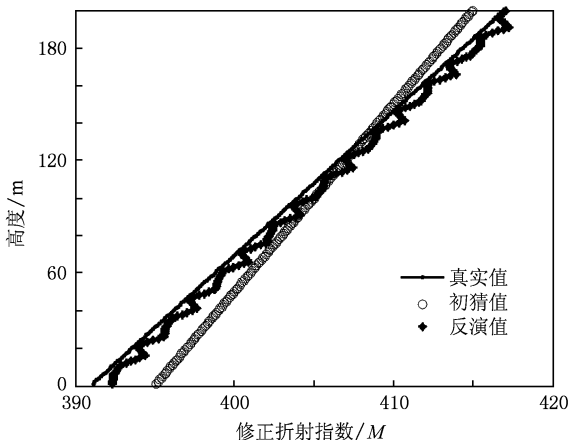


图 1 不引入正则化项时变分伴随方法的反演结果

2.2. 引入正则化项时变分伴随方法的反演结果

在引入正则化项时, 目标泛函、泛函梯度和 $g(U)$ 项的表达式见文献 [10]. 为了验证引入正则化项对反演中出现不适宜问题的改进效果, 下面设计的数值试验和上述相同, 真实值和初猜值的表达式均为 $m = M_0 + cz$, 各参数的取值也与上述相同.

图 2 给出了引入正则化项后反演结果与真实值的对比. 从图 2 可以看出, 采用正则化方法后, 反演值与真实值几乎重合, 说明引入正则化项后, 反演方法具有较强的去高频噪声能力, 采用正则化方法后的反演精度比此前要高. 从图 2 还可以发现, 反演折射率廓线上部与真实值存在较大的偏差, 这可能主要是由于伴随方程中的顶部边界条件采用近似“海绵体”边界条件所致, 这就是伴随反演中存在的末端约束问题.

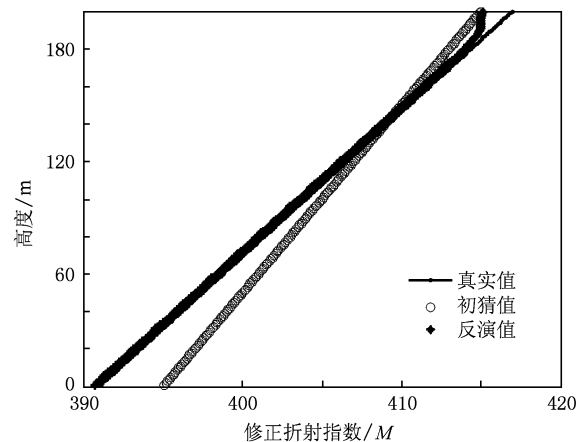


图 2 引入正则化项后变分伴随方法的反演结果

3. 实际雷达回波资料变分伴随正则化方法的反演结果

目前国际上所有的研究成果中对实际雷达资料反演海洋波导都是基于统计反演算法, 作者至今未见利用物理反演算法(变分伴随方法)的相关报道, 故对资料处理、算法等方面均需要重新设计. 下面首先讨论变分伴随方法迭代格式的建立, 然后对实际雷达资料的反演结果与真实值作对比分析, 并讨论反演精度对初猜值的依赖程度.

3.1. 处理实际雷达资料时变分伴随方法迭代格式的建立

在处理实际雷达资料时, 由于资料的误差特性

与理想状态下相差很大,实际雷达回波资料最优的观测值权重函数很难获取,故在设计目标泛函时观测值权重函数项不存在.由于实际雷达回波资料一般都是平扫方式,数据为雷达平扫数据格式,实际的观测资料只是单条线的观测值,并不是整个平面空间都有观测资料,同时考虑到离雷达太近和太远处的回波资料精度没有保证,必须删去.此时目标泛函表示为

$$J[m] = \frac{1}{2} \int_{r_1}^{r_2} (L(U) - P_r^{\text{obs}}) dx + \frac{\gamma}{2} \int_{r_1}^{r_2} \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right|^2 dx = J_0 + J_1. \quad (1)$$

在具体计算中,(1)式中的 r_1 和 r_2 分别取 10 和 60 km. 泛函梯度的表达式可表示为

$$\nabla_m J = -2k_0^2 m \int_0^L \text{Re}(\bar{U}P) dx. \quad (2)$$

$g(U)$ 的表达式如下:

$$g(U) = -2B \frac{(L(U) - P_r^{\text{obs}})U}{|U|^2} - \gamma \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}. \quad (3)$$

(1)–(3)式中相关符号的意义见文献[10].

在变分伴随的反演算法设计中,初猜值是否准确对最后反演结果的精度影响较大,特别是在处理雷达回波资料反演海洋波导这种高度非线性问题时,对初猜值的依赖性更大.在实际反演过程中,若随便按经验模型给定一初猜值,往往会导致反演失败.因此,在实际反演时需要先通过标准的遗传算法统计反演给出较准确的反演值,然后将其作为变分伴随反演算法的初猜值,再利用变分伴随算法进行反演.

下面简要说明利用变分伴随方法从实际雷达回波资料中反演海洋波导的四个步骤.

第一步,采用标准的遗传算法统计反演给出较准确的反演值,然后将其作为 m 参数变量的初始猜测值.

第二步,利用新的猜测值,对模式方程进行求解,获得反演值 $U(x, z)$, 并加以存贮.

第三步,利用 $U(x, z)$ 可求出 $g(U)$, 将 $g(U)$ 代入伴随模式方程,利用 Fourier 变换可进一步计算出 $\nabla_m J$ 的泛函梯度值.

第四步,利用适当的下降算法,求出步长 ρ^{k+1} , 按照 $m^{k+1} = m^k - (\nabla_m J) |_{m^{(k)}} \rho^k$ 对大气折射指数 m 进行迭代,求出新的大气折射指数 m 值.

对于所求大气折射指数 m 的泛函梯度值.如果满足程序终止条件(如达到所要求的 10^{-4} 收敛精度

或是虽未达到此精度,但最大迭代次数已达到预定的 20 次),终止程序;若终止条件不满足,则利用新的 m 参数变量从第二步开始进行新一轮的迭代循环.

3.2. 变分伴随正则化方法的反演结果对初猜值精度的依赖性

在设计变分伴随算法时,考虑到大气折射指数随高度变化的特性,垂直方向每隔 5 m 取一个格点.同时还考虑到计算的适定性,不应引入过多的反演参数,因此这里不考虑大气折射指数随距离变化的情况,认为不同距离处的大气折射指数是相同的.按以上所述的处理实际雷达资料时变分伴随方法迭代格式的步骤进行反演.

为了验证变分伴随方法反演的精度和对初猜值的依赖程度,设计了两组试验.第一组试验中初猜值是按经验模型给定的,然后利用变分伴随方法进行 10 次左右的迭代进行反演,反演结果如图 3 所示.第二组试验中初猜值是遗传算法统计反演结果,然后利用变分伴随方法进行迭代反演.第二组试验中初猜值是遗传算法统计反演进行 1000 次迭代后的结果,然后利用变分伴随方法进行迭代反演,迭代次数也在 10 次左右,反演结果如图 4 所示.

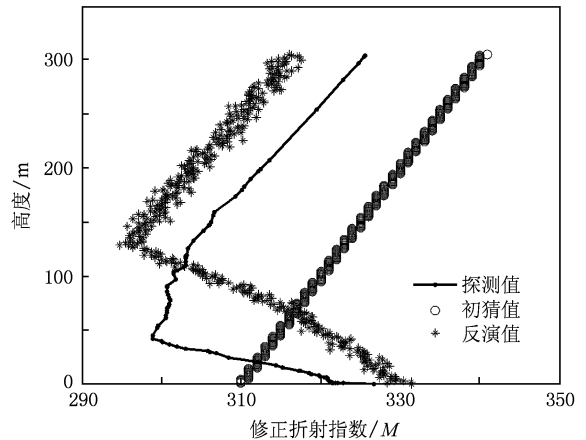


图 3 初猜值按经验模型给定时,变分伴随正则化方法的反演结果

对比图 3 和图 4 可知,不论初猜值怎么给定,变分伴随正则化方法对折射指数廓线的变化都有一定的描绘能力,但由于实际情况下折射指数廓线的变化呈现高度非线性,因而利用变分伴随正则化方法不能完全精确地描绘折射指数的变化情况,只能描绘出折射指数变化的趋势.与传统的统计反演算法(遗传算法、贝叶斯-蒙特卡罗方法等)相比,变分

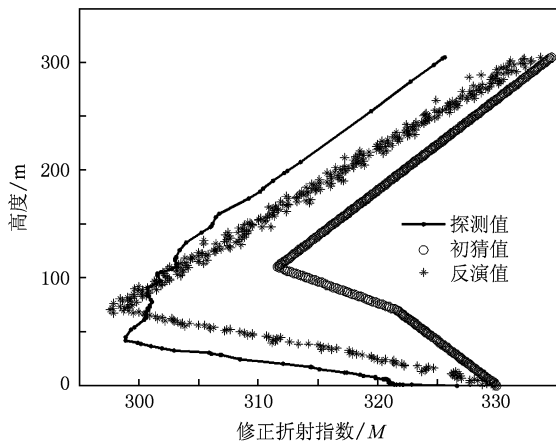


图4 初猜值为统计反演结果时,变分伴随正则化方法的反演结果

伴随正则化方法的迭代次数可减小 3 个量级左右,可很好地提高反演的速度.变分伴随正则化方法的反演精度对初猜值的依赖程度很高,较好的初猜值可很好地提高最后的反演精度,并减小反演过程中出现的振荡现象(图 4 的反演结果与图 3 相比要平滑很多).

4. 结 论

本文针对目前国际上采用的统计反演算法计算量过大的问题,发展了一种全新的物理反演方法(变分伴随正则化方法),并在反演精度、耗时性与传统统计反演方法进行了简单对比.反演结果表明,基于微分方程最优控制的变分伴随方法应用于地型抛物方程的反演研究是可行的,可以利用变分伴随正则化方法对海洋波导结构进行比较成功的反演.

在利用变分伴随正则化方法对模拟雷达回波资料的反演结果分析表明,全局资料情形由于信息丰富,所以反演比较容易,且反演精度高.在此情况下,主要由于信息丰富使得反演问题较适定,即便未采取正则化方法也能大概反演出海洋波导的结构,但会存在一定的计算振荡问题.文中利用反问题中处理不适定问题的思想(即正则化思想),在目标泛函中引入稳定泛函.试验结果证明,采用此方法可以对用普通方法进行模式参数反演时所产生的振荡有很好的抑制作用.对于正则化参数 γ 的值是依照经验给出的,具体如何给定,是一个非常复杂的问题,这里不再赘述.

在处理实际雷达资料中,只有局部观测资料,在局部资料反演中由于信息严重匮乏,反演难度较大.此时,反问题正则化思想是反演成功的重要保证,能够较好解决反演计算中出现的振荡问题,使目标泛函较快下降,从而提高反演精度.可能由于地型抛物方程本身是高度非线性的,因而采用变分伴随正则化方法反演的结果与真实值之间存在一定的差异.虽然此方法的反演精度要略低于传统的统计反演算法(遗传算法、贝叶斯-蒙特卡罗方法等),但与统计反演算法相比,变分伴随正则化方法的迭代次数可减小 3 个量级左右,能提高反演的速度.变分伴随正则化方法的反演精度对初猜值的依赖程度很高,较好的初猜值可提高最后的反演精度,并减小反演过程中出现的振荡现象.文中利用变分伴随正则化方法只对单个资料进行反演试验,但是从数学理论和实际反演结果证明变分伴随正则化方法从实测雷达回波中反演海洋波导结构是可行的.

[1] Yan H J, Fu Y, Hong Z J 2006 *Introduction to Modern Atmospheric Refraction* (Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House) (in Chinese) [严豪健、符养、洪振杰 2006 现代大气折射引论(上海:上海科技教育出版社)]

[2] Gossard E E, Strauch R G 1983 *Radar Observation of Clear Air and Clouds* (New York: Elsevier)

[3] Krolik J L, Tabrikian J 1998 *Proceedings of the 1997 Battlespace Atmospherics Conference* (San Diego: Space and Nav. Warfare Sys. Command Centre)

[4] Rogers L T, Hattan C P 2000 *Radio Sci.* **35** 955

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

[6] Vasudevan S, Anderson H R, Kraut S, Gerstoft P 2007 *Radio Sci.* **42** 2014

[7] 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]

[8] Sheng Z, Huang S X, Zheng G D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4335 (in Chinese) [盛 峥、黄思训、曾国栋 2009 物理学报 **58** 4335]

[9] Sheng Z, Huang S X, Zhao X F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6627 (in Chinese) [盛 峥、黄思训、赵小峰 2009 物理学报 **58** 6627]

[10] 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]

Ocean duct inversion from radar clutter using variation adjoint and regularization method (II) : inversion experiment *

Sheng Zheng Huang Si-Xun[†]

(*Institute of Meteorology, University of Science and Technology, Chinese People's Liberation Army, Nanjing 211101, China*)

(Received 31 July 2009; revised manuscript received 17 November 2009)

Abstract

On the theoretical basis, using simulated and measured radar clutter data, we tested the inversion algorithm respectively. In simulated radar clutter data inversion, inversion results with and without considering the regularization item are discussed. In real radar clutter data inversion, dependence of the inversion results on the precision of the first guess values is discussed, in which the first guess values are either empirical model values or statistics inversion results, respectively. Finally, the advantages and disadvantages are compared between the variation adjoint regularization algorithm and the traditional statistical inversion algorithm, pointing out the direction of improvement in future work.

Keywords: ocean duct, radar clutter, variation adjoint, regularization

PACC: 4110H, 9265D

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40775025) .

[†] Corresponding author. E-mail: huangxp@yahoo.com.cn