

文章编号: 1672-8785(2017)11-0011-05

正则化变分同化 AIRS 红外 高光谱水汽资料研究

靳双龙¹ 王 根^{2,3*}

- (1. 中国电力科学研究院新能源与储能运行控制国家重点实验室, 北京 100192 ;
2. 安徽省气象信息中心安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 安徽合肥 230031;
3. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁沈阳 110016)

摘 要: 结合经典变分同化和正则化约束两者的优点, 对多正则化参数约束变分同化方法进行了研究。与经典变分同化中背景和观测项对目标泛函等权重不同, 正则化约束对观测项权重进行调节, 并在正则化参数优化时基于 Huber—估计法给定权重函数。高光谱大气红外探测器 (Atmospheric Infrared Sounder, AIRS) 水汽通道模拟亮温试验表明, 本文的变分法同化 AIRS 亮温资料比经典变分同化法的效果更好。基于信号自由度诊断了观测资料对分析场的影响, 结果表明本文的方法能够有效挖掘水汽通道的亮温信息。

关键词: 变分同化; AIRS; 正则化约束; Huber—估计; 信号自由度

中图分类号: P407 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.11.003

Research on Regularization Variational Assimilation of Water Vapour Data from Atmospheric Infrared Sounder

JIN Shuang-long¹, WANG Gen^{2,3*}

- (1. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy and Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
2. Anhui Meteorological Information Centre, Anhui Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031, China ;
3. The Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016, China)

Abstract: In combination with the advantages of classical variational assimilation and regularization constraint, a multi-parameter regularization constraint assimilation method is studied. Unlike the weight of background and observation to the objective functional of classical variational assimilation, the regularization constraint can adjust the weight of observation term and give the weight function on the basis of Huber-estimator weight function during regularization parameter optimization. Simulation brightness temperature experiment is made for the water vapor channel of the Hyper-spectral Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). The result shows that the variation method studied is better than the classical variational assimilation method. The influence of observation data on analysis fields is diagnosed on the basis of the degree of freedom for signals. The result shows that the method studied can effectively extract the brightness temperature information from the water channel of AIRS.

收稿日期: 2017-08-01

基金项目: 国家电网公司科技项目; 安徽省自然科学基金项目 (1708085QD89);
中国气象局沈阳大气环境研究所开放基金课题 (2016SYIAE14)

作者简介: 靳双龙 (1984-), 男, 甘肃静宁人, 博士, 高级工程师, 主要从事数值模拟、电力气象技术研究。

E-mail: jinshuanglong@epri.sgcc.com.cn * **通讯作者** E-mail: 203wanggen@163.com

Key words: variational assimilation; AIRS; regularization constraint; Huber-estimator; degree of freedom for signal

0 引言

数值天气预报 (Numerical Weather Prediction, NWP) 是一个初 / 边值问题。同化卫星资料则为数值预报模式提供尽可能精确的初始状态^[1]。高光谱大气红外探测器 (Atmospheric Infrared Sounder, AIRS) 搭载在地球观测系统 (Earth Observing System, EOS) 第二颗卫星 Aqua 上。其采用红外光栅阵分光技术, 2378 个通道覆盖了 650~2700 cm^{-1} 红外谱区域, 光谱主要覆盖 CO_2 和 H_2O 吸收带, 被用来探测精细的大气温度和湿度等^[1,2]。

国内外相关学者针对 AIRS 反演得到的模式空间资料开展了同化研究。Susskind 等^[3] 通过同化 AIRS 反演得到的温度信息提高了数值预报的精度; Liu 等^[4] 通过用集合变换卡尔曼滤波同化 AIRS 反演的比湿信息, 发现在多变量同化试验中能得到更平衡的分析场; Li 等^[5] 通过用局地集合变换卡尔曼滤波同化 AIRS 反演的温度信息提高了分析和预报的精度。

目前水汽通道亮温资料的直接同化具有一定的挑战性, 国内外直接同化 AIRS 水汽资料的相关参考文献较少。James 等^[6] 分析了 AIRS 水汽通道同化的难点, 将其归因于水汽通道亮温和雅克比 Jacobi 矩阵等的非线性。变分同化迭代过程中水汽通道亮温偏差存在周期性波动, 导致极小化迭代较难收敛或者迭代失败。若对水汽通道亮温采取严格的质量控制, 则会剔除相当一部分“正确可用”的所谓的“离群值”, 丢失很多有用的信息^[6]。因此, 为充分利用 AIRS 光谱通道信息, 需要构建水汽通道亮温同化新算法。

本文中, 将通用的变分同化方法记为经典变分同化。经典变分同化要求误差服从高斯分布以应用最小二乘理论, 且要求变分同化中背景和观测项对目标泛函等权重相同^[1]。通过相应的误差协方差矩阵给定权重。原始经典变分同化的代价函数中, 背景项和观测项的均等权重

不合理, 由此得到的分析场不一定能使泛函取到最小值^[7]。本文将研究如何结合水汽通道亮温偏差的非高斯性, 引入反问题中的正则化强 / 弱约束方法^[8], 以期挖掘并合理使用 AIRS 不同水汽通道的亮温信息。

基于钟剑等^[9] 算法的思想和 Wang 等^[1] 前期研究的基础, 文中使用的多正则化参数约束变分同化把正则化约束耦合到经典变分同化框架中, 正则化参数优化基于 Huber—估计权重函数。为了对新算法进行验证和度量变分同化相应 AIRS 通道资料对分析场的影响, 基于信号自由度 (Degrees of freedom for signal, DFS)^[10] 进行了 AIRS 资料影响诊断。

1 多正则化参数约束变分同化理论分析

因 AIRS 不同水汽通道观测资料误差的特性不同, 对 AIRS 不同水汽通道分别引入正则化参数^[1,10]。区别于经典变分同化^[11], 将多正则化参数约束变分同化目标泛函定义为

$$J^\alpha(x) = \frac{1}{2} \|x^b - x\|_{B^{-1}}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_{obs}} \alpha_i \|y_i^o - H_i(x)\|_{R^{-1}}^2 = \min! \quad (1)$$

式中, 正则化参数 α_i 为第 i 个通道对目标泛函的影响; n_{obs} 为通道数。

对于正则化参数约束变分同化, 正则化参数选取至关重要。较小的 α 能够减小通道亮温对结果的影响; 较大的 α 能够引入更多的观测信息。把稳健性较强的 M-估计法中的 Huber-估计引入到正则化参数估算中, 实现变分同化极小化迭代中参数的“动态”优化。

$$\alpha_i(r_i) = (1/r_i) \bullet (dF(r_i)/dr_i) \quad (2)$$

式中, $F(\bullet)$ 为 Huber—估计代价函数; $\alpha_i(r_i)$ 为对角矩阵; $r_i = [y_i - H_i(x)]/\sigma_i$, y_i 和 $H_i(x)$ 分别表示通道 i 的观测和模拟亮温, σ_i 是观测误差协方差矩阵 \mathbf{R} 的对角元素平方根。

2 正则化变分同化 AIRS 水汽通道亮温试验分析

2.1 相关模型介绍

涉及到的模型包括通道亮温模拟的快速辐射传输模式 RTTOV^[12] 和同化试验的变分同化系统^[10] 两种。

变分同化系统是基于欧洲卫星数值天气预报应用研究小组开发的一维变分 (1DVar) 同化模型^[10]。本文在原模型的基础上进行了部分修改: (1) 只考虑温度、湿度、O₃(气候态) 等廓线和 2 m 温度、2 m 湿度、*u*、*v* 风场、地表气压、地表温度, 关闭其它变量 (如云廓线等); (2) 添加正则化变分同化和伴随代码; (3) 添加正则化参数 Huber—估计代码。

2.2 数据准备

2.2.1 背景场廓线和观测亮温介绍

变分同化分析时必须进行大气背景状态估计。在实际变分同化系统中, 通过早期模式预报得到背景场。选用 1DVar 自带廓线集中的某条廓线作为“真实”廓线, 以相应的模拟亮温作为“真实”亮温。结合欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 建立的黑名单 (与 Cameron 博士讨论交流的结果) 和前期研究基础^[13], 共选出 370 个水汽通道以进行亮温同化研究。

真实温度和湿度廓线以添加的高斯随机误差作为背景廓线^[14], 则有:

$$x^b = x^t + \sum \varepsilon_i \lambda_i^{1/2} L_i \quad (3)$$

式中, x^b 为扰动后的背景廓线; x^t 为真实廓线; L_i 和 λ_i 分别是背景误差协方差矩阵 B 的特征向量和特征值; ε_i 是均值为 0、方差为 1 的高斯随机数。

结合水汽通道的固有特点, 在水汽通道的“真实亮温”中加入 100 次拉普拉斯随机误差扰动, 以得到的亮温值为观测亮温, 则有:

$$y = H(x^t) + \varepsilon_0 \mathbf{R}^{1/2} \quad (4)$$

式中, y 为扰动后的亮温, 即观测亮温; $H(x^t)$ 为真实廓线模拟得到的真实亮温; ε_0 为拉普拉斯随机数; \mathbf{R} 为观测误差协方差矩阵。

2.2.2 观测和背景误差协方差矩阵介绍

参考 Eyre 等^[15] 和 Rabier 等^[16] 的方法构建温度和比湿误差值, 以相对湿度为参数进行研究。因高层水汽几乎为 0, 对 100 hPa 以上的层相对湿度的相关性赋予 0, 再进行背景误差协方差矩阵的构建。背景误差协方差矩阵需呈对称正定分布。

2.3 经典变分同化和多正则化参数约束变分同化结果的分析与比较

为了分析和比较原始经典变分 (记为“Classical”) 和文中方法 (记为“Regularization”) 的同化效果, 统计了 AIRS 370 个水汽通道亮温同化反演后的亮温、温度和湿度均方根误差 (Root mean square error, RMSE), 如图 1 所示。

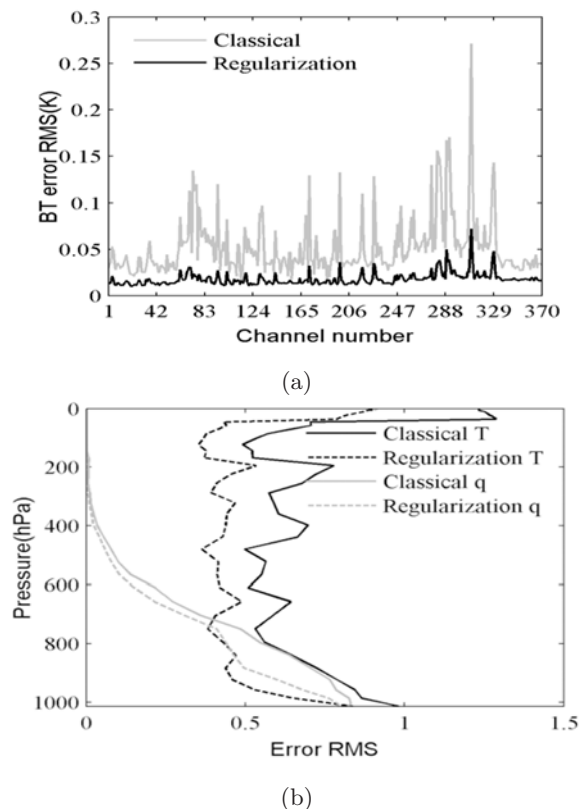


图 1 基于不同变分方法的亮温、温度和湿度均方根误差

从图 1 可以看出, 基于多正则化参数约束变分同化的亮温、温度和湿度效果最好。因经典

变分同化需要进行质量控制以剔除所谓的离群值, 这些数据被剔除后在极小化过程中将不再使用。而多正则化参数约束变分同化对亮温偏差较大的通道目标泛函赋予较小的权值, 使得每次被“拒绝”的通道亮温能再次被变分极小化迭代使用, 从而能更有效地挖掘和使用资料。

图 2 给出了本试验中某个迭代过程采用 Huber—估计权重函数衡量通道观测亮温对目标泛函的权重, 给出了此廓线极小化迭代第 1 次、37 次和 93 次 AIRS 370 个通道的 α_i 值。

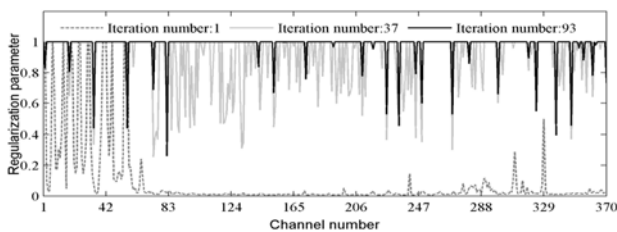


图 2 AIRS 水汽通道极小化迭代过程中正则化参数值的分布

从图 2 可知, 在初始估计中, 由于通道观测亮温偏差较大, 很多通道的正则化参数 α 值都较小。由于后面的每次迭代过程都对背景廓线进行了有效修正, 偏差逐渐趋于合理。结合图 1 的分析可知, 水汽通道亮温同化尤为关键。

图 3 统计了采用经典变分和本文方法同化 AIRS 370 个通道 100 条廓线的 DFS 影响率所占的百分比。

通道 i 的 DFS 影响率百分比 $DFS_Channel_i$ 定义为

$$DFS_Channel_i = \left(\sum_{j=1}^{100} DFS_{i,j} / \sum_{i=1}^{370} \sum_{j=1}^{100} DFS_{i,j} \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中, i 为通道数, j 为廓线数。

从图 3 可以看出, 经典变分同化和基于 Huber—估计函数的多正则化参数得到的通道 DFS 具有一定的相似性, Huber—估计函数是经典变分和多正则化参数约束变分同化的“结合体”。相连通道的影响率较一致, 其中波数在 1560.2 cm^{-1} 通道的贡献率较大。这说明经典变分同化基于误差服从高斯分布的假定具有一定的

局限性。多正则化参数约束变分同化有效地“挖掘”出了 AIRS 水汽通道信息, 并进行了较好的同化使用。

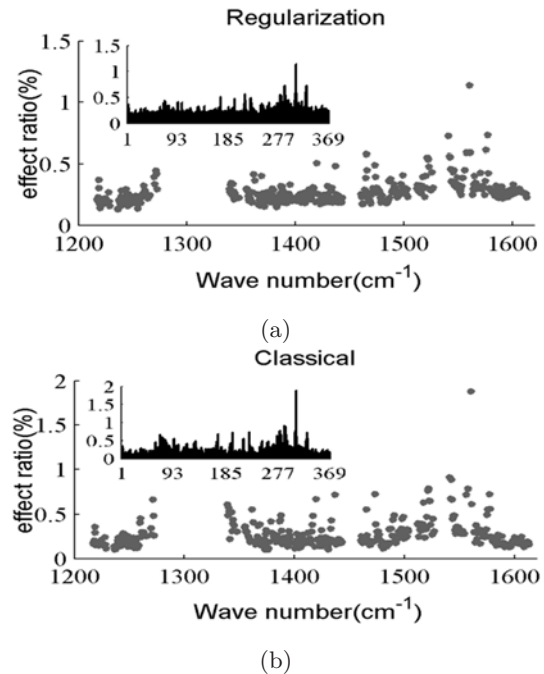


图 3 基于不同算法同化 AIRS 通道亮温对分析场的影响率百分比

3 总结与展望

高光谱 AIRS 通道多且信息量大。为充分有效地利用 AIRS 通道亮温, 本文结合经典变分和正则化的优点, 构建了多正则化参数约束变分同化目标泛函及相应的梯度, 得到了较好的同化效果。具体结论如下:

(1) 在经典变分同化目标泛函中耦合正则化参数, 具有较好的同化效果, 其原因为正则化参数能较好地抑制和突显 AIRS 不同通道亮温对目标泛函的贡献。

(2) 使用稳健性较强的 Huber—估计权重函数作为正则化参数值的度量, 与常规 L 曲线等方法相比, 具有较高的时效性和业务应用价值。

(3) 基于 DFS 进行了 AIRS 资料对分析场的影响诊断。试验中, 多正则化参数约束能较好地不同水汽通道亮温的合理同化利用。

本文仅对算法的应用进行了研究, 并开展了理想试验, 代表性不够。相较于经典变分同化

方法,多正则化参数约束变分同化耗时较长。后期将开展自适应正则化参数研究,并进一步将成果应用到天气研究和预测模型数据同化中,以进行大量实际个例的同化应用研究。

参考文献

- [1] Wang G, Zhang J. Generalised Variational Assimilation of Cloud-affected Brightness Temperature Using Simulated Hyper-spectral Atmospheric Infrared Sounder Data[J]. *Advances in Space Research*, 2014, **54**(1): 49–58.
- [2] Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua Mission: Design, Science Objectives, Data Products, and Processing Systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(2): 253–264.
- [3] Susskind J, Reale O. Improving Forecast Skill by Assimilation of AIRS Temperature Soundings[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2010:3534–3537.
- [4] Liu J, Li H, Kalnay E, et al. Univariate and Multivariate Assimilation of AIRS Humidity Retrievals with the Local Ensemble Transform Kalman Filter [J]. *Monthly Weather Review*, 2009, **137**(11): 3918–3932.
- [5] Li H, Liu J J, Fertig E. Improved Analyses and Forecasts with AIRS Temperature Retrievals Using the Local Ensemble Transform Kalman Filter[J]. *J. Trop Meteorol*, 2011, **17**(1): 43–49.
- [6] James A J, John F, Le M, et al. The Development of Hyper-spectral Infrared Water Vapor Radiance Assimilation Techniques in the NCEP Global Forecast System[C]. *CMWF/EUMETSAT NWP-SAF Workshop on the assimilation of IASI in NWP*, 2009–2009.
- [7] 赵延来, 黄思训, 杜华栋, 等. 正则化方法同化多普勒天气雷达资料及对降雨预报的影响 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(7): 882–893.
- [8] 黄思训, 伍荣生. **大气科学中的数学物理问题**[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [9] 钟剑, 费建芳, 程小平, 等. 基于多正则化参数约束的四维变分同化方法及其对台风预报的影响 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, **44**(7): 1532–1543.
- [10] 王根, 唐飞, 刘晓蓓, 等. M-估计法广义变分同化 FY3B/IRAS 通道亮温 [J]. *遥感学报*, 2017, **21**(1): 52–61.
- [11] 张华, 薛纪善, 庄世宇, 等. 2004.GRAPES 三维变分同化系统的理想试验 [J]. *气象学报*, **62**(1): 31–41.
- [12] Saunders R, Brunel P, English S, et al. RTTOV-8-Science and Validation Report[R]. Eumetsat/ECMWF SAF Programme, UK, Document ID NWPSAF-MOTV-007, EX1 3PB, 2005.
- [13] 王根, 陆其峰, 张建伟, 等. 高光谱大气红外探测器通道选择方法及试验研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2014, **29**(5): 795–802.
- [14] Pavelin E G, English S J, Eyre J R. The Assimilation of Cloud-affected Infrared Satellite Radiances for Numerical Weather Prediction[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2008, **134**(632): 737–749.
- [15] Eyre J R, Kelly G A, McNally A P, et al. Assimilation of TOVS Radiance Information Through One-dimensional Variational Analysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1993, **119**(514): 1427–1463.
- [16] Rabier F, McNally A, Andersson E, et al. The ECMWF Implementation of Three-dimensional Variational Assimilation (3D-Var). II: Structure Functions[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1998, **124**(550): 1809–1829.

新闻动态 News

法国 Sofradir 与 ATD Electronique 签署欧洲分销协议

据 www.sofradir.com 网站报道, 航空航天、国防和商业市场全球领先的先进红外探测器制造商 Sofradir 在 11 月 15 日宣布, 与 ATD Electronique 达成分销合作关系, 以扩大 Sofradir 的短波红外 (Short Wave Infrared, SWIR) InGaAs 探测器的欧洲客户群。

使用 Sofradir InGaAs 成像探测器的欧洲客户

现在可以从 ATD Electronique 公司接受设计支持和供应链管理服务。ATD Electronique 是创新电子元件和 CMOS 图像传感器主流品牌的知名分销商。

全球最大的红外探测器供应商 Sofradir 每年生产约 8,000 个红外探测器, 探测元数稳步增长。其 InGaAs SWIR 产品由于具有顶尖的性能在各种工业和监控应用中引起了极大的关注。ATD 将帮助 Sofradir 满足市场对快速检修技术、端端成像系统专业知识的需求, 缩短采购周期。

□ 张小华