

文章编号: 1001 - 9014 (2008) 02 - 0109 - 06

利用卫星红外遥感资料反演大气温湿廓线的 三维物理统计方法

张 蕾, 邱崇践

(兰州大学 大气科学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:对黄静等提出的基于奇异值分解技术 (SVD) 的由卫星辐射观测反演大气温湿廓线的物理统计方法作出改进, 改进后的方法在三维空间实施 SVD, 使反演过程不仅考虑了大气温度和湿度垂直结构的统计特征, 也能同时考虑其水平结构特征. 使用模式资料 and 实际资料对所提方法进行验证并将反演结果与原有的一维方法作了比较. 结果表明, 新方法可以有效地降低观测误差的影响, 反演结果明显好于原方法.

关键词:反演; 统计物理方法; 奇异值分解; 卫星资料

中图分类号: P407 **文献标识码:** A

THREE-DIMENSIONAL STATISTICAL-PHYSICAL METHOD OF ATMOSPHERIC PARAMETERS RETRIEVALS FROM SATELLITE INFRARED MEASUREMENTS

ZHANG Lei, QIU Chong-Jian

(College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A new method based on singular value decomposition (SVD) technique was proposed to improve the one-dimensional statistical-physical method introduced by Huang et al. In this method, the vertical statistical characteristics and the horizontal characteristics of the temperature and humidity were considered in the retrieval procedure by applying the SVD in a three-dimensional space. The advantage of the proposed method was demonstrated by using simulated and real data. The results were compared with those of the original one-dimensional statistical-physical retrieval method. Our results show that the proposed method has the ability to reduce the influence of observation error efficiently and it behaves better than the original method both for temperature and humidity retrievals.

Key words: retrieval; statistical-physical method; singular value decomposition; satellite data

引言

由卫星遥感资料反演大气温度和湿度廓线是一个不适定的问题, 解不唯一, 而且对观测误差极为敏感^[1]. 许多研究表明, 采用经验正交函数分解或奇异值分解技术来表征大气温湿廓线的垂直结构, 可以大大减少反演的变量个数, 增加反演的稳定度, 是解决这一问题的有效途径^[2-10]. 最近黄静等^[11]提出一种基于奇异值分解技术的物理统计反演方法, 基本做法是选择一组大气温湿廓线资料样本, 根据大气辐射传输模式计算相应的辐射亮温, 将二者耦

合再利用奇异值分解 (SVD) 技术从这组样本中产生正交基函数, 这些基函数反映了大气温湿廓线和卫星观测测量之间的基本关系, 截取前几个占优势的基函数, 将实际观测的亮温资料按照这些基函数展开就可以得到要反演的大气温湿廓线, 试验表明反演效果会好于传统的一维变分反演方法^[11]. 然而该方法用于 HRS/3 的辐射资料的反演时, 为了保证反演的稳定性一般只能截取头两个基函数来表征大气的垂直结构, 这样会产生很大的截断误差, 影响了反演的精度. 考虑到辐射观测误差的水平结构一般与大气温度和湿度的水平结构特征会有很大的差

收稿日期: 2007 - 03 - 29, 修回日期: 2007 - 09 - 26

基金项目: 国家自然科学基金 (40375009) 资助项目

作者简介: 张 蕾 (1979-), 女, 江苏邳州人, 兰州大学博士研究生, 主要从事卫星资料的反演与同化研究.

Received date: 2007 - 03 - 29, revised date: 2007 - 09 - 26

异,可以将原方法在垂直方向施行的 SVD 扩展到三维空间,这样,在将辐射观测投影到由大气温度和湿度样本产生的正交基函数过程中大部分观测误差有可能被滤除,从而会增加反演的稳定性. 根据这一思想提出了三维物理统计反演方法,利用 NCEP(美国国家环境预测中心)再分析资料和由模式产生的辐射资料检验了方法的可靠性,使用一组实际资料对两种方法的反演效果作了比较.

1 反演方法

假设反演区域内有 N_s 个观测点,也是需要反演的大气参数(温度和湿度)廓线的点,在每个点上选定 M 次大气参数的观测值,记为向量 \mathbf{x} ,利用这些大气参数观测由辐射传输方程得到对应的辐射亮温值,称为模拟亮温值,记为 \mathbf{R}^s . 将大气参数观测值和对应的辐射亮温值一起组成一个样本数为 M 的集合,记为 $\mathbf{Q} = (\mathbf{x}, \mathbf{R}^s)$,将集合中的每一个样本分别求距平得到 $\mathbf{x} = \mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}$, $\mathbf{R}^s = \mathbf{R}^s - \bar{\mathbf{R}}^s$,相应的 $\mathbf{Q} = (\mathbf{x}, \mathbf{R}^s)$,并将列向量 \mathbf{Q} 组成的矩阵记为 \mathbf{A} ,它的维数为 $N \times M$,这里 $N = G + C$, G 是 3 维空间格点数和大气参数量的积, C 是使用的卫星观测通道数. 解耦合特征值问题

$$\mathbf{Q} \mathbf{Q}^T \mathbf{b}_i = \lambda_i^2 \mathbf{b}_i, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

基向量 \mathbf{b}_i 可以分解为

$$\mathbf{b}_i = (\mathbf{Y}_i, \mathbf{D}_i), \quad (2)$$

这里 $\mathbf{Y}_i = (b_i^1, \dots, b_i^G)$ 与参数对应, $\mathbf{D}_i = (b_i^{G+1}, \dots, b_i^N)$ 观测对应. 将待反演的大气参数(距平)记为 \mathbf{x}_r , 实际的观测增量记为 \mathbf{R} , 可以将耦合得到的向量 $\mathbf{Q}_r = (\mathbf{x}_r, \mathbf{R})$ 表示为下面的展开形式

$$\mathbf{Q}_r = \sum_{p=1}^P a_p \mathbf{b}_p, \quad (3)$$

$P = \min(N, M)$ 是截断阶数. 显然有

$$\mathbf{R} = \sum_{p=1}^P a_p \mathbf{D}_p, \quad (4)$$

和

$$\mathbf{x}_r = \sum_{p=1}^P a_p \mathbf{Y}_p. \quad (5)$$

由已知的卫星观测 \mathbf{R} 利用最小二乘方法求解线性代数方程(4)得到系数,根据式(5)就可以得到所要的大气参数(温度和湿度)距平. 可以看到,本文提出的方法和黄静等提出的方法之不同就在于将原来的一维反演变为三维反演. 以下将新方法简称为三维方法,原方法称为一维方法.

2 理想数值试验

2.1 模式和资料

RTIOV 是由 ECMWF 开发的用于在数值预报中同化卫星资料的快速辐射传输模式系统^[12-14],本文选用其第七版本 RTIOV7. 该模式可以根据输入的大气温度、湿度、 O_3 、云中液态水垂直廓线以及若干云和表面参数计算不同卫星探测器相应通道的辐射亮温值. 试验假定观测数据为 HRS/3 19 个通道的辐射亮温值. 将东经 110 至东经 120° 北纬 25° 至北纬 35 之间的区域作为反演区,以每一个经纬度格点作为一个观测点,用 NCEP 每日 4 次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料作为大气温湿廓线的观测资料,反演区域内共有 121 个观测点. 用于奇异值分解的数据样本是 2000—2003 年共 4 年的 7 月 1~31 日每日 06 UTC 的 122 组大气温湿廓线资料及根据这些资料计算的对应的辐射亮温. 将 2003 年 7 月 31 日 12 UTC NCEP 再分析资料的大气温湿廓线作为“真实”大气廓线,将其代入辐射传输模式中计算得到的亮温值作为“真实”亮温,然后在“真实”亮温上叠加一定大小的随机误差作为观测值. 反演使用的背景廓线是样本廓线的平均值.

2.2 试验结果

在文献[11]中看到,使用一维方法反演时如果 SVD 的截断阶数 P 过大,反演结果对观测误差就很敏感,对于 19 个通道的 HRS/3 资料,当亮温误差标准差为 2.0K 时截断阶数 P 只能取到 2^[11]. 为了确定适合于三维方法的截断阶数,设定亮温误差标准差为 0.25K 和 4.0K 时分别计算不同截断阶数下所有 121 个格点反演的温度均方根误差. 图 1(a) 和图 1(b) 分别给出这两种观测误差水平下反演的温度均方根误差随高度的变化. 可以看到,当观测误差为 0.25K 时(图 1(a)),截断阶数取值较大时反演误差较小,不过 $P=60$ 和 $P=80$ 时反演误差在 200hPa 以下区别已经不明显. 只有在大气高层(200hPa 以上) $P=80$ 时反演误差较大. 当观测误差为 4.0K 时, $P=40$ 时反演效果最好(图 1(b)). 湿度反演的情况与温度反演类似,具体不再叙述. 需要指出我们的试验是以 NCEP 资料作为样本资料,在 10hPa 以上没有温度资料,在 100hPa 以上没有湿度资料,而辐射传输模式 RTIOV7 要求提供从地面直到 0.1hPa 的大气温湿廓线,这些资料只能通过外插得到,这样得到的样本资料显然不能反映高层大气温度和湿度的统计结构,这可能是在高层反

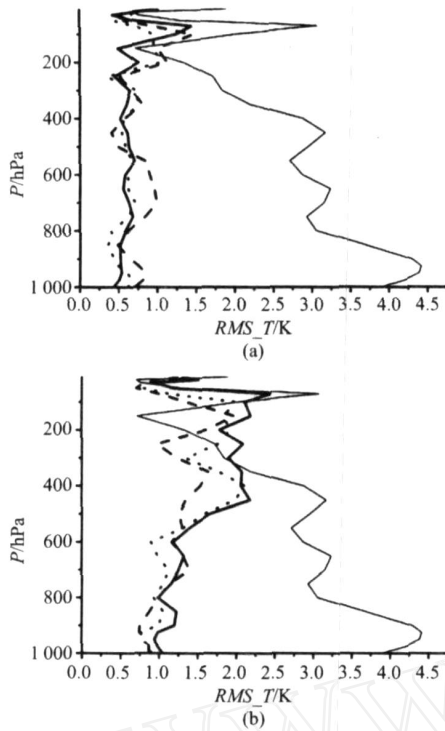


图 1 观测误差为 0.25K(图 (a))和 4.0K(图 (b))时取不同截断阶数三维物理统计反演法温度的反演误差. 细实线代表背景误差,长划线、点线和粗实线分别代表截断阶数取 40、60、80时统计的反演误差

Fig 1 The RMS retrieval errors of temperature with different truncation number when the observation errors are 0.25K (a) and 4.0K (b), respectively. Thin solid line denotes background error, thick dash line, dot line and thick solid line denote the RMS retrieval errors when truncation number are 40, 60 and 80, respectively

演效果较差的一个原因.

设定亮温观测误差为 2.0K比较两种方法的反演结果. 图 2 是一维方法和三维方法得到的计算区域内各个高度反演的 121条温湿廓线平均的均方根误差比较,对一维和三维方法截断阶数分别取 $P=2$ 和 $P=40$ 可以看到,无论是温度或者湿度廓线反演,两种方法在 300hPa以下对背景廓线的修正都比较多,三维方法的反演误差远远小于一维方法. 300hPa以上,两种方法反演的结果相差较小,在多数高度上三维方法的反演结果仍然较好. 图 3 给出亮温观测误差 2.0K时 700hPa高度上两种反演方法得到的相对湿度增量场(反演场减背景场)和相对湿度真实增量场(真实场减背景场)比较. 可以看到,由三维方法反演得到的相对湿度增量场水平结构与真实增量场比较接近,而由一维方法反演得到的相对湿度增量场不能很好地反映其水平结构特征. 温度场与湿度场结果类似,在此不再详细叙述.

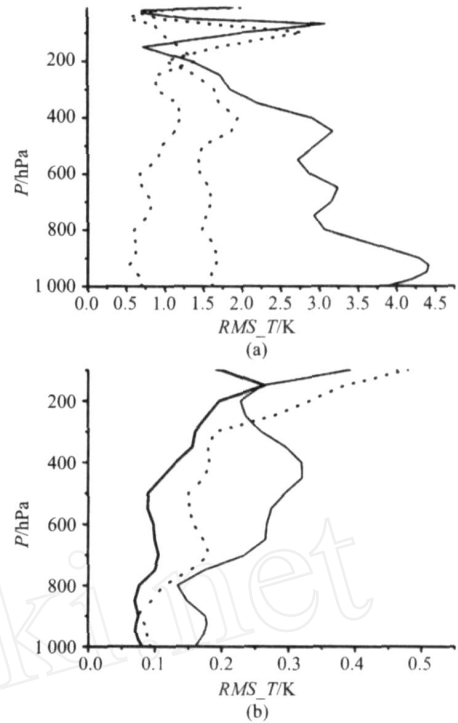


图 2 观测误差为 2.0K时两种方法的温度(图 (a))和相对湿度(图 (b))反演误差比较. 细实线代表背景误差,点线和粗实线分别代表一维和三维方法的反演误差

Fig 2 The RMS retrieval errors for temperature (a) and relative humidity (b) when the observation error is 2.0K. Thin solid line denotes background error, dot line and thick solid line denote the RMS retrieval error for one-dimensional and three-dimensional method, respectively

表 1 不同观测误差和截断阶数(P)下两种方法得到的平均的温度反演误差统计(单位:K)

Table 1 Averaged RMS retrieval errors for temperature with different observation errors and truncation number in five experiments (unit: K)

观测误差 (K)	0.25	0.5	1.0	2.0	4.0	
背景误差 (K)	2.6712	2.6712	2.6712	2.6712	2.6712	
$P=2$	1.0911	1.1190	1.2238	1.5620	2.4065	
一维方法	$P=3$	1.0524	1.1082	1.3042	1.8759	3.2372
$P=4$	1.0533	1.1366	1.4059	2.1541	3.8701	
$P=5$	0.9844	1.0819	1.4021	2.2020	4.0200	
三维方法	$P=40$	0.7860	0.7912	0.8114	0.8871	1.1540
$P=60$	0.6500	0.6626	0.7052	0.8487	1.2796	
$P=80$	0.6542	0.6711	0.7318	0.9331	1.5038	

统计不同观测误差和不同截断阶数下两种方法得到的所有计算点整层平均的温度和相对湿度反演误差,结果分别列于表 1和表 2 对于温度(表 1),三维方法的反演误差在所有试验中均小于一维方法的反演误差,当观测误差较小时(0.5K),两种方法的反演误差差别不是很大,随着观测误差不断增大(1.0K),两种方法的差别就越来越明显,三维

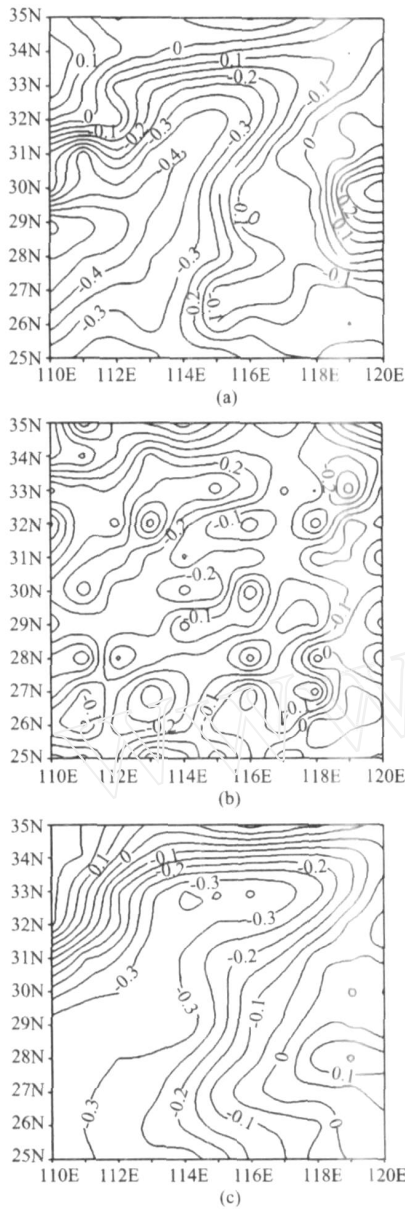


图3 观测误差为2.0K时700hPa高度相对湿度增量场分布 (a) 真实增量场 (b) 一维方法反演的相对湿度增量场 (c) 三维方法反演的相对湿度增量场
 Fig 3 The relative humidity field at 700hPa when observation error is 2.0 K (a) true increment field (b) retrieved relative humidity increment field from 1D method (c) retrieved relative humidity increment field from 3D method

方法的反演结果明显好于一维方法。当观测误差为4.0K时,一维方法得到的平均反演误差已经接近或者大于背景场误差,而三维方法依然可以得到比较好的反演结果。相对湿度反演的情况与温度类似(表2)。

2.3 两种方法的反演误差分析

利用相同的大气参数(温度和湿度)观测样本,相同的观测资料和相同的辐射传输模式,三维方法

表2 不同观测误差和截断阶数(P)下两种方法得到的平均的相对湿度反演误差统计

Table 2 Averaged RMS retrieval errors for relative humidity with different observation errors and truncation number in five experiments

观测误差 (K)	0.25	0.5	1.0	2.0	4.0
背景误差	0.1956	0.1956	0.1956	0.1956	0.1956
一维方法	$P=2$ 0.1238	$P=3$ 0.1252	$P=4$ 0.1308	$P=5$ 0.1507	$P=60$ 0.2097
三维方法	$P=40$ 0.0897	$P=60$ 0.0908	$P=80$ 0.0937	$P=100$ 0.1011	$P=120$ 0.1212

会好于一维方法,我们认为其原因是引起反演误差的2个因素对二者的影响是不同的。这2个因素分别是观测误差的影响和按照式(5)展开时产生的截断误差的影响。其中,截断误差是随着截断阶数的增加而减小的,而由式(4)看到观测误差的影响则是随截断阶数的增加而增加的。所以两种方法都会有一个最优的截断阶数来平衡二者的影响。

首先考察观测误差对两种方法的影响。将观测

误差 ϵ 按照(4)式展开:
$$\epsilon = \sum_{p=1}^P E_p \mathbf{D}_p$$
这时被过

滤部分 $\epsilon - \sum_{p=1}^P E_p \mathbf{D}_p$ 是不会对反演产生影响的。定义

误差滤除率为 $r = \left| \epsilon - \sum_{p=1}^P E_p \mathbf{D}_p \right| / \epsilon$ 。一维

方法也有相应的展开式和误差滤除率,不过基函数是一维的。根据上面数值试验中所采用的观测误差(标准差为2.0K的情况)计算不同截断阶数P下所有反演点上平均的误差滤除率,结果见图4。横坐标表示观测误差滤除率,左右纵坐标分别表示一维方法和三维方法的截断阶数。可以看到对一维方法而言,误差滤除率对截断阶数很敏感。要保证误差滤除率 $r > 0.95$,一维方法只能取 $P=2$,而对于三维方法,误差滤除率对截断阶数不敏感, $P=80$ 时都能保证误差滤除率 $r > 0.95$ 。

下面考察两种方法的截断误差。对一维方法取 $P=2$,三维方法取 $P=60$,将真实大气参数距平按

照(5)式展开:
$$\mathbf{x} = \sum_{p=1}^P X_p \mathbf{D}_p$$
截断误差是 $\mathbf{x} - \sum_{p=1}^P X_p \mathbf{D}_p$,根据上面试验所用的真实大气参数值

分别计算两种方法在不同高度处所有反演点上平均的截断误差,见图5a和图5b。可以看到,在保证相同的误差滤除率条件下,不论是温度还是相对湿度,

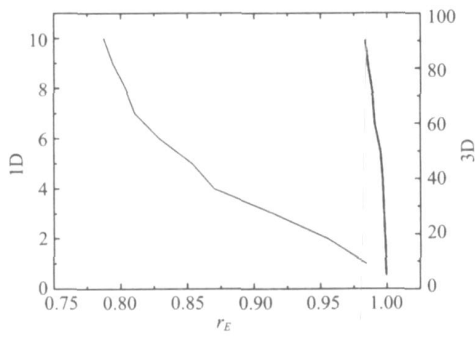


图 4 一维 (细实线)和三维 (粗实线)方法平均观测误差滤除率随截断阶数的变化

Fig 4 The averaged filter rate of observation error plotted as functions of truncation number for one-dimensional (thin line) and three-dimensional (thick line) retrieval method when observation error is 2.0K

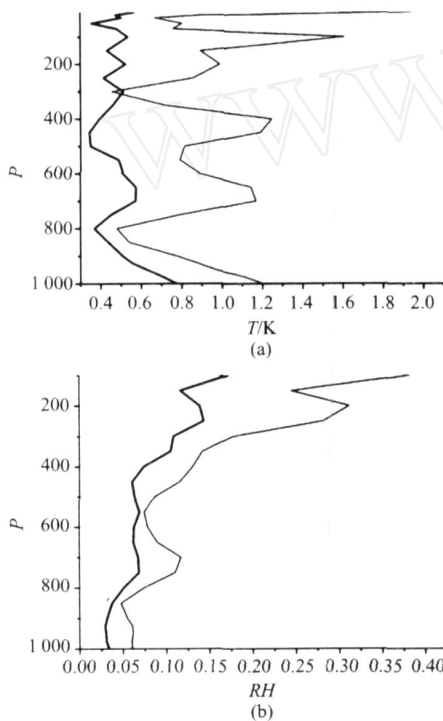


图 5 两种方法中大气温度 (图 (a))和相对湿度 (图 (b))的截断误差比较. 细实线代表一维方法的截断误差,粗实线代表三维方法的截断误差

Fig 5 The truncation error of temperature (a) and relative humidity (b) from one-dimensional (thin line) and three-dimensional (thick line) method

三维方法的截断误差均小于一维方法,这就是三维方法会好于一维方法的根本原因.

3 实际资料反演结果

将两种物理统计反演方法分别应用于实际卫星观测资料的反演. 选取 2002 年 7 月 31 日 05: 57

UTC的晴空观测值反演大气温湿廓线. 将 1999—2002 年 7 月份每日 06 UTC 的 $1^\circ \times 1^\circ$ NCEP再分析资料作为数据样本,背景场取反演时刻 24h前的 NCEP格点资料,为了使由廓线样本计算的辐射亮温与卫星观测的辐射亮温相匹配,采用双线性插值方法将格点资料插值到卫星观测点上. 将与卫星观测时空间匹配 (要求二者的水平距离在一个经纬度之内,即大约 110km)的探空观测作为真值来检验反演效果. 参照 Li et al (2000)^[15]的方法对观测点作晴空筛选,然后将筛选出来的点作质量控制,去掉背景场模拟观测值与实际观测值之差各通道平均值大于 5.0K的点,经过筛选留下范围在 $100^\circ \text{E} \sim 125^\circ \text{E}$ 和 $20^\circ \text{N} \sim 45^\circ \text{N}$ 区域内的 37 个满足条件的晴空点. 最后对满足要求的点分别采用两种方法反演大气的温湿廓线,再将反演结果和与之匹配的探空观测进行对比计算出反演点的均方根反演误差. 反演时一维和三维方法分别取 $p=2$ 和 $p=40$

图 6 是采用两种反演方法得到的 37 个点平均的大气温度和相对湿度的均方根误差. 总的来说三维方法会好于一维方法,其中在 200hPa以下三维方法反演的温度明显好于一维方法的反演结果,

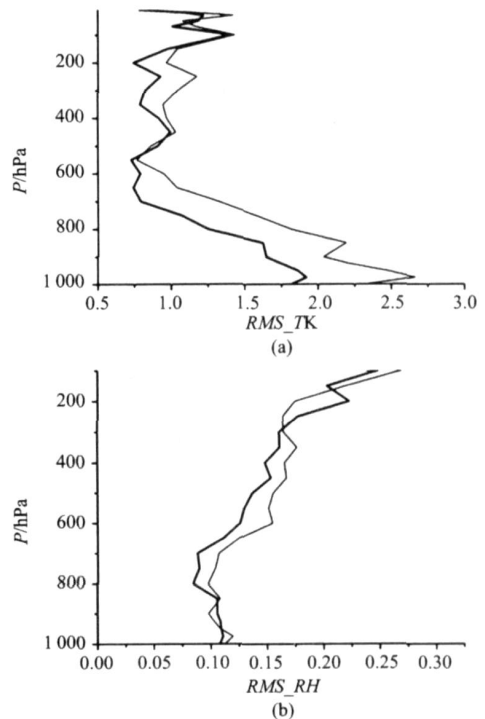


图 6 两种方法的温度 (图 a)和相对湿度 (图 b)反演误差比较. 细实线和粗实线分别代表一维和三维方法的反演误差

Fig 6 The RMS retrieval errors for temperature (a) and relative humidity (b) thin solid line and thick solid line denote the RMS retrieval error for one-dimensional and three-dimensional method, respectively

200hPa以上两种方法的反演结果相近. 对于相对湿度来说,在 850hPa至 300hPa之间三维方法的反演结果好于一维方法,其它高度则各有好坏.

4 结论

本文提出的三维物理统计反演方法对原有的一维反演方法作了改进. 在根据历史资料样本用 SVD 技术产生基函数时,三维方法得到的基函数是三维空间的向量,它不但反映了大气参数在垂直空间的结构以及和观测量的联系,也反映了大气参数的水平空间结构以及在不同点之间大气参数和观测量之间的联系,分析表明这样可以滤除更多的观测误差,从而减少对观测误差的敏感度,提高反演精度. 利用模式资料所作的数值试验和实际资料反演结果表明,无论是对温度或湿度,三维方法的反演精度都会明显高于一维方法,当观测误差较大时其优势更加明显. 不过在将三维方法用于实际时候会遇到一个困难:需要有在空间足够稠密的观测资料来产生反演所需要的历史资料样本,利用探空资料可能不能满足要求,本文在作实际资料反演时,将 NCEP再分析资料作为历史资料样本,结果表明这一做法是可行的,是否可以利用水平分辨率较高的大气模拟资料或者同化资料形成历史资料样本是有待研究解决的问题.

REFERENCES

- [1] Thompson O E, Dazlich D D, Hou Y T. The ill-posed nature of the satellite temperature retrieval problem and the limits of retrievability[J]. *J Atmos Ocean Tech*, 1986, **3**: 643—649.
- [2] Thompson O E. Regularizing the satellite temperature retrieval problem through singular value decomposition of the radiative transfer physics[J]. *Mon Wea Rev*, 1992, **120**: 2314—2328.
- [3] Smith W L, Woolf H M. The use of eigenvectors of statistical covariances for interpreting satellite sounding radiometer observations[J]. *J Atmos Sci*, 1976, **33**: 1127—1140.
- [4] Smith W L, Woolf H M, Schriener A J. *Simultaneous Retrieval of Surface Atmospheric Parameters: A Physical and Analytically Direct Approach*. *Advance in Remote Sensing Retrieval Methods* [M]. Hampton: Deepack publishing V A, 1985, 221—232.
- [5] Uddstrom M J. Retrieval of atmospheric profiles from satellite radiance data by typical shape function maximum a posteriori simultaneous retrieval estimators[J]. *J Appl Meteorol*, 1988, **27**: 515—549.
- [6] LI Jun, HUANG Si-Xun. Application of improved discrepancy principle in inversion of atmosphere infrared remote sensing[J]. *Science in China (series D)* (李俊,黄思训.改进的偏差原则在大气红外遥感及反演中的应用.中国科学, D辑), 2001, **31**: 70—80.
- [7] Uspensiy A B, Romanov S V, Trotsenko A N. Use of principal components technique for the analysis of advanced sounders data[J]. *J Earth Res from space Russian Acad Sci* 2003, **3**: 26—33 (in Russian).
- [8] Bouttier F, Courtier P. Data assimilation concepts and methods[R]. *Meteorological Training Course Lecture Series*, 1999, 1—20.
- [9] Thompson O E, Goldberg M D, Dazlich D A. Pattern recognition in the satellite temperature retrieval problem[J]. *J Clin Appl Meteor*, 1985, **24**: 30—48.
- [10] Thompson O E. Regularizing the satellite temperature retrieval problem through singular value decomposition of the radiative transfer physics[J]. *Mon Wea Rev*, 1992, **120**: 2314—2328.
- [11] HUANG Jing, QU Chong-Jian, ZHANG Yan-Wu. Statistical-physical method for retrieving the clear atmospheric parameters from satellite infrared measurements[J]. *J Infrared Millim. Waves* (黄静,邱崇践,张艳武.一种利用卫星红外遥感资料反演晴空大气参数的物理统计方法.红外与毫米波学报), 2007, **26** (2): 102—106.
- [12] Saunders R, Matricardi M, Brunel P. A fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations-RTTOV-5[R]. *ECMWF Tech Memo*, 1999, **282**.
- [13] MA Gang, QU Chong-Jian, LI Guang-Qing, et al. Study of simulation on radiance from infrared and water vapor channel of FY2B by a fast forward model RTTOV7[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (马刚,邱崇践,黎光清,等.利用 RTTOV7快速辐射传输模式模拟风云二号红外和水汽成像通道辐射率的研究.红外与毫米波学报), 2006, **25** (1): 37—40.
- [14] SHI Chun-Xiang, XIE Zheng-Hui. Operational method of total precipitable water retrieved from satellite multi-channels' infrared data[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (师春香,谢正辉.卫星多通道红外信息反演大气可降水业务方法.红外与毫米波学报), 2005, **24** (4): 304—308.
- [15] Li J, Wolf W, Menzel P, et al. Global soundings of the atmosphere from ATOVS measurement: The algorithm and validation[J]. *J Appl Meteor*, 2000, **39**: 1248—1268.