

用卫星遥感资料反演气象参数的 误差分析及数值试验

张 文 建

(北京大学地球物理系,北京,100871)

黎 光 清 董 超 华

(国家卫星气象中心,北京,100081)

提 要

首先从理论分析入手,定性地探讨了用气象卫星遥感探测辐射测值反演气象参数的误差特性,进而用同步物理反演法进行了反演误差的数值试验,定量地揭示了反演误差的来源及特性。这些理论分析和数值试验对设计遥感系统、提高反演精度等都具有一定的指导意义。

一、引 言

气象卫星遥感反演产品在数值天气预报、天气分析和气象科学研究中正在起着日益重要的作用。由于遥感反演问题的复杂性,所以反演的气象参数会存在着一定的误差。研究分析这些误差的来源及其特性,是提高反演精度、推广应用反演产品的关键,对最佳遥感反演系统(包括仪器和反演方法)的设计也具有指导意义。

反演产品是通过遥感反演系统获得的。所谓遥感反演系统,指的是遥感探测仪器和反演方法的综合。遥感反演系统的输入是表征实际大气状态的辐射测值,输出是反演的大气状态参数。遥感误差是指遥感探测过程中由于各种原因(如仪器噪声、定标误差等)造成的探测辐射与实际值之差。这类误差只有靠提高遥感探测技术才能使之减小。在遥感探测能达到某种要求精度的情况下,由于遥感反演问题的非适定性本质,使精确反演解是非唯一和不稳定的,因此必须用某种稳定的反演算法得到合理的近似解。反演误差就是指这种近似解与精确解之差。

二、遥感反演误差理论分析

从卫星遥感探测值反演大气状态参数,其反演算法可写成如下形式:

$$\hat{X} - X_0 = W \cdot [Y_m - Y_c(X_0)] \quad (1)$$

式中 \hat{X} 和 X_0 分别表示反演的和参考的大气状态向量, Y_m 表示多通道辐射或亮温测值向量, $Y_c(X_0)$ 是根据 X_0 按某种正演模式计算的相应向量, W 表示反演算子。 Y_m 按辐射传递的正演问题可表达为:

$$Y_m = F(X, \alpha) + \varepsilon_m \quad (2)$$

其中 X 为真实大气状态向量, α 为模式参数向量的真值。 $F(X, \alpha)$ 为真实大气辐射传递函数, ε_m 为测值噪声。

为了进行误差分析,把式(2)相对于参考大气状态 X_0 和参考模式参数 α_0 进行线性化:

$$Y_m = F(X_0, \alpha_0) + \frac{\partial F}{\partial X}(X - X_0) + \frac{\partial F}{\partial \alpha}(\alpha - \alpha_0) + \varepsilon_m \quad (3)$$

按某种正演模式 F_c , 根据 X_0 和 α_0 计算的 $Y_c(X_0)$ 为:

$$Y_c(X_0) = F_c(X_0, \alpha_0) \quad (4)$$

将(3)式和(4)式代入(1)就可得到:

$$\begin{aligned} \hat{X} - X_0 = & (Q - I) \cdot (X - X_0) + W \cdot [F(X_0, \alpha_0) - F_c(X_0, \alpha_0)] \\ & + Q_\alpha \cdot (\alpha - \alpha_0) + W \cdot \varepsilon_m \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $Q = W \cdot \frac{\partial F}{\partial X}$, $Q_\alpha = W \cdot \frac{\partial F}{\partial \alpha}$, I 为单位矩阵。

方程(5)可作为分析遥感反演误差的理论依据。反演的大气状态向量与其真值之差来自于方程右端四项误差贡献之和。右端第一项为验前信息误差映射项。对一个理想的遥感反演系统(权重函数呈 δ 函数形状)来说, Q 应是个单位矩阵,这样反演结果就与验前参考大气状态 X_0 的选择无关。但实际的遥感反演系统并非如此, Q 实际上是一个代表峰值函数的模式分辨率矩阵,其峰值宽度是由遥感反演系统探测的垂直分辨率决定的。本项误差的协方差矩阵为:

$$S_i = (Q - I) \cdot S_x \cdot (Q - I)^T \quad (6)$$

式中 S_x 为真值大气状态向量与其参考状态 X_0 之差的协方差矩阵,上标 T 表示矩阵转置。在遥感探测技术有限的条件下,选择最佳的参考大气状态 X_0 就变得非常重要。在物理反演算法中, X_0 作为反演算法的起点以显式给出。在统计反演算法中, X_0 隐含在回归系数矩阵中,即回归系数向量是由验前参考状态的平均量来确定的。所以统计反演法和用气候值作为初始参考大气状态的物理反演法在季节转换、天气系统影响时反演精度都显著下降,其原因就是这种情况下 S_x 变大的缘故。初始参考大气状态的系统偏差也造成反演结果的系统偏差。

第二项称为正演模式误差项。式中 F 为实际大气的辐射传输方程,它包括实际大气中所有的辐射物理过程,如地表面、大气、云和气溶胶的发射、散射等。而 F_c 则是反演系统中正演计算所用的一种较为理想的数学模型,通常假设其为晴空、无散射的平面平行大气的辐射传递方程。对红外遥感反演来说,当探测视场内很晴朗,下垫面反射也很小时,此项误差很小,反之该项误差变大。其中探测视场有云时造成的误差最大,这是由于云高变化范围大,视场中的云量难以确定,所以等效晴空辐射订正难以准确的缘故。对于微波遥感反演来说,由于非降水云对微波辐射影响很小,所以此项误差即使在有云区域也较小。

第三项称为模式参数误差项。它是由于计算模式中采用的模式参数(如光谱参数、定

标参数和光谱响应函数等)与其真值有偏差而造成的。本项误差的协方差矩阵为:

$$S_p = Q_a \cdot S_a \cdot Q_a^T \tag{7}$$

式中 S_a 即为 $\alpha - \alpha_0$ 的协方差矩阵。在进行湿度廓线反演时,温度廓线是作为模式参数的,所以温度廓线的反演误差会进一步造成湿度廓线的反演误差,这也是湿度廓线反演精度不高的主要原因之一。微波段下垫面比辐射率的不确定性会造成微波反演低层温度廓线的较大误差。

第四项是探测噪声误差项。一般都假定 ϵ_m 为零的高斯分布。本项误差的协方差矩阵为:

$$S_N = W \cdot S_e \cdot W^T \tag{8}$$

式中 S_e 是通道测值噪声的协方差矩阵。如果各通道测值是独立的,则 S_e 是对角矩阵。在实验室标定基础上,具体仪器的 S_e 是可计算的。由于星上仪器性能会随时间衰变,某些通道的噪声会变大。反演过程中应定期检测各通道噪声,避免使用噪声大的通道测值,以减小此项对反演精度的影响。

三、同步物理反演法误差的数值试验

作为示例,把上述各项误差概念应用到同步物理反演算法^[3]中,以期定量了解各项误差对遥感反演误差的影响。表1给出了数值试验所用的模式大气温度廓线和湿度廓线。表中 LEVEL 代表反演计算的40个层次, PRES. 表示对应的气压值(单位 hPa), TEMP. 和 WMIX. 分别表示温度廓线(单位:K)和水汽混合比廓线(单位:g/kg)。试验中把此模式大气作为真值,首先用同步物理反演法中的正演模式,根据模式大气计算出各通道亮温作为模拟探测亮温,然后依据实际反演中可能出现的情况假设误差,并进行反演,最后将反演结果与模式大气比较就可确定其误差对反演精度的影响。

表1 数值试验所用模式大气

LEVEL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PRES.	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	7.0
TEMP.	234.3	249.2	265.5	270.2	265.0	259.2	251.3	246.2	242.5	236.5
WMIX.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LEVEL	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
PRES.	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	50.0	60.0	70.0	85.0	100.0
TEMP.	230.5	226.0	223.2	220.8	218.5	213.5	211.7	209.8	208.7	208.5
WMIX.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LEVEL	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PRES.	115.0	135.0	150.0	200.0	250.0	300.0	350.0	400.0	430.0	475.0
TEMP.	208.8	210.2	212.7	219.0	227.1	235.3	242.2	248.5	252.3	256.8
WMIX.	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04	0.10	0.20	0.34	0.48	0.80
LEVEL	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
PRES.	500.0	570.0	620.0	670.0	700.0	780.0	850.0	920.0	950.0	1000.0
TEMP.	259.5	265.8	270.0	273.5	276.2	281.0	284.3	287.5	289.5	291.7
WMIX.	1.02	1.57	2.14	2.81	3.59	4.69	6.15	7.45	8.98	10.4

1. 参考大气状态偏差对反演精度的影响

同步物理反演法程序中用气候值作初估参考大气状态,这种参考大气状态与实际大气的偏差会有多种情况,下面仅考虑两个典型的情况。

(1)参考廓线与实际大气廓线有系统偏差 在季节转换、天气系统影响时就会出现。试验中假设温度初估廓线有一3K的系统偏差,其对反演精度的影响如表2所示。表中各列所用符号意义为: P 表示气压, T 和 W 分别表示模式大气温、湿度廓线, \hat{T} 和 \hat{W} 分别表示相应的反演值。 $\Delta T = \hat{T} - T$, $\Delta W = \hat{W} - W$,分别表示温度和水汽混合比反演误差, $W(\%)$ 表示反演水汽混合比的相对误差。从表2中可以看出反演误差幅度随高度分布呈余弦波状。两个峰值分别为-1.7K和1.3K,可见误差是比较严重的。

表2 温度初估廓线系统偏差为-3K时造成的反演误差

$P(\text{hPa})$	$T(\text{K})$	$\hat{T}(\text{K})$	$\Delta T(\text{K})$	$W(\text{g/kg})$	$\hat{W}(\text{g/kg})$	$\Delta W(\text{g/kg})$	$\Delta W(\%)$
10	230.5	230.8	0.3	0.00	0.00	0.00	0
20	223.2	223.9	0.7	0.00	0.00	0.00	0
30	218.5	219.5	1.0	0.00	0.00	0.00	0
50	213.5	214.7	1.2	0.00	0.00	0.00	0
70	209.8	211.1	1.3	0.00	0.00	0.00	0
100	208.5	209.3	0.8	0.00	0.00	0.00	0
150	212.7	212.5	-0.2	0.01	0.01	0.00	0
200	219.0	218.4	-0.6	0.01	0.01	0.00	0
250	227.2	226.3	-0.9	0.04	0.04	0.00	0
300	235.3	234.3	-1.0	0.10	0.10	0.00	0
400	248.5	247.3	-1.2	0.34	0.26	-0.08	-25
500	259.5	258.1	-1.4	1.02	0.77	-0.25	-24
700	276.2	274.7	-1.5	3.59	3.54	-0.05	-1
850	284.3	282.8	-1.5	6.15	5.89	-0.26	-4
1000	291.7	290.0	-1.7	10.42	9.25	-1.17	-11

(2)低层初估温度廓线有偏差 即使非季节转换,也无天气系统影响,太阳辐射也会造成对流层低层较大的温度日变化。当处理中午或半夜(地方时)过境卫星的资料仍使用气候值作参考初估廓线时,就会在对流层低层造成较大的初估偏差。为了考察这种偏差对反演的影响,数值试验中在模式大气温廓线的低层加上一个 $\Delta T(P)$,并令 $\Delta T(P)$ 满足下式:

$$\Delta T(P) = \Delta T(P_0) \left(1 - \frac{40 - M}{N}\right) \quad (9)$$

式中 $\Delta T(P_0)$ 代表地面层的温度偏差,考虑一般气温日较差为 10°C 左右,这里取 $\Delta T(P_0)$ 为5K。 M 就是表1中模式大气的层次, N 是考虑气温日变化影响所波及的层数,这里假定 N 为5。数值试验结果见表3。从表3可以看出,低层温度初估偏差不仅造成了严重的低层反演误差,而且误差也波及到中、高层。所以反演时必须对边界项作合理处理,以避免这种现象出现。

2. 模式误差和模式参数误差对反演精度的影响

由于模式误差和模式参数误差的复杂性,通常采用综合订正的办法。从式(1)可见反演质量依赖于 Y_m 与 $Y_c(X_0)$ 之差的准确度。如果用较准确的探空资料作为参考状态代入式(5),此时应有 $\hat{X} = X_0 = X$ 。在晴空条件下,对任何合理的遥感反演系统都要求式(5)应满足:

$$W \cdot [F(X, \alpha_0) - F_c(X, \alpha_0)] + Q_a(\alpha - \alpha_0) + W \cdot \varepsilon_m = 0 \quad (10)$$

表3 低层温度初估偏差 5K 时造成的反演误差

P(hPa)	T(K)	T(K)	$\Delta T(K)$	W(g/kg)	W(g/kg)	$\Delta W(g/kg)$	$\Delta W(\%)$
10	230.5	229.8	-0.7	0.00	0.00	0.00	0
20	223.2	222.3	-0.9	0.00	0.00	0.00	0
30	218.5	217.5	-1.0	0.00	0.00	0.00	0
50	213.5	212.4	-1.1	0.00	0.00	0.00	0
70	209.8	208.7	-1.1	0.00	0.00	0.00	0
100	208.5	207.4	-1.1	0.00	0.00	0.00	0
150	212.7	211.7	-1.0	0.01	0.01	0.00	0
200	219.0	218.1	-0.9	0.01	0.01	0.00	0
250	227.2	226.2	-1.0	0.04	0.04	0.00	0
300	235.3	234.3	-1.0	0.10	0.11	0.01	10
400	248.5	247.3	-1.2	0.34	0.38	0.04	12
500	259.5	258.3	-1.2	1.02	1.24	0.22	22
700	276.2	279.9	3.7	3.59	5.27	1.68	47
850	284.3	288.1	3.8	6.15	9.78	3.63	59
1000	291.7	295.6	3.9	10.42	16.92	6.50	62

表4 NOAA-10 TOVS 仪器探测亮温与
计算亮温偏差统计(单位:K,样本数:906)

HIRS2	AVR	STD
4	-0.52	0.48
5	-0.43	0.52
6	-0.13	0.74
7	-0.35	0.87
8	0.31	1.10
10	0.90	0.79
11	2.36	1.40
12	4.18	1.58
13	1.65	0.55
14	-0.87	0.54
15	-2.84	0.53
MSU	AVR	STD
2	-0.70	1.72
3	-1.46	1.36
4	-1.05	1.13

综合订正的目的就是使式(10)成立,其具体办法就是用准确的探空资料计算出的各通道亮温值与空间、时间匹配的相应探测值进行偏差统计。本试验用 1988 年 10 月份 22 条轨道的 NOAA-10 卫星实测资料与匹配的探空资料进行了偏差统计,得出了表 4 的亮温偏差统计结果。表中第一列为 HIRS2 和 MSU 仪器的通道序号,第二、三列分别为平均偏差和标准差。统计过程中对卫星探测值进行了严格的晴空检验,对探空廓线也进行了质量检验,加上统计样本足够大,因此可以认为统计偏差是客观存在的。由于 100hPa 以上探空资料稀少,所以对 HIRS2 仪器的 1—3 通道未进行偏差统计。

为了验证这种偏差对反演的影响,把表 4 的平均偏差作为亮温误差进行数值试验,其结果如表 5 所示。结合表 4 分析可以看出,由于大部分低层温度探测通道有负的偏差,所以在 400hPa 至 1000hPa 之间也造成了较大的温度反演负偏差。有些模式参数,如红外和微波段的下垫面比辐射率 ϵ 。随下垫面性质(水面、陆地、植被情况等)和季节而变化,所以实际业务系统必须按不同区域、季节进行类似的偏差订正,否则就不能用物理反演法得到理想的反演结果。

模式参数误差影响反演精度的另一个例子就是温度廓线反演误差对湿度廓线反演精度的影响。同步物理反演法也是在温度廓线反演之后把温度廓线作为模式参数再反演湿度廓线的,所以湿度廓线的反演精度也取决于温度廓线反演的质量。这里仍以表 2、表 3 试验结果为例,这两例中初估湿度廓线是没有偏差的,但由于初估温度廓线偏差造成温度

表 5 探测亮温与计算亮温偏差造成的反演误差

$P(\text{hPa})$	$T(\text{K})$	$\hat{T}(\text{K})$	$\Delta T(\text{K})$	$W(\text{g/kg})$	$\hat{W}(\text{g/kg})$	$\Delta W(\text{g/kg})$	$\Delta W(\%)$
10	230.5	230.6	0.1	0.00	0.00	0.00	0
20	223.2	222.9	-0.3	0.00	0.00	0.00	0
30	218.5	218.1	-0.4	0.00	0.00	0.00	0
50	213.5	213.2	-0.3	0.00	0.00	0.00	0
70	209.8	210.3	0.5	0.00	0.00	0.00	0
100	208.5	209.5	1.0	0.00	0.00	0.00	0
150	212.7	213.5	0.8	0.01	0.01	0.00	0
200	219.0	219.6	0.6	0.01	0.01	0.00	0
250	227.2	227.3	0.1	0.04	0.04	0.00	0
300	235.3	235.1	-0.2	0.10	0.07	-0.03	-30
400	248.5	247.7	-0.8	0.34	0.16	-0.18	-53
500	259.5	258.3	-1.2	1.02	0.56	-0.46	-45
700	276.2	274.7	-1.5	3.59	3.69	0.10	3
850	284.3	282.9	-1.4	6.15	6.67	0.52	8
1000	291.7	290.4	-1.3	10.42	11.41	0.99	10

廓线反演误差,进而又造成湿度廓线的反演误差。特别是从表 3 中可以看到,低层温度廓线初估的偏差造成的低层湿度廓线反演误差是很严重的,这再次强调了提高湿度反演精度必须以提高温度反演精度为基础。

以上数值试验仅考虑了各项单独影响反演精度的情况,实际遥感反演过程中是各种因子综合影响反演精度的,造成的误差也更复杂。设计合理的遥感反演系统必须正确解决上述各项误差的影响,才能得到较为理想的反演产品。

四、结 论

1. 气象卫星遥感反演系统的误差可归纳为遥感误差和反演误差两方面。通过对遥感反演系统的理论分析证明遥感反演误差来自于验前信息误差映射、正演模式误差、模式参数误差和探测噪声误差四项误差之和。

2. 由于遥感探测技术的限制,所以反演中最佳参考大气状态的选择仍是提高反演精度、提高资料处理效率的一个重要途径。参考大气状态的系统偏差会造成反演结果的系统误差。

3. 由于反演模式及模式参数误差的复杂性和时间、空间的可变性,必须对不同区域的探测辐射或亮温与其计算值之差进行定期的综合订正或拟合,以期用物理反演法得出较理想的反演结果。

4. 积极发展微波遥感反演系统是提高有云区域反演精度的有效手段。

5. 用同步物理反演法所作的数值试验定量地揭示了各项误差对反演精度的影响,证实了理论分析的正确性。

参 考 文 献

- [1] 黎光清、董超华,应用 Bayes 算法估计核函数误差对大气温度廓线反演的影响,大气科学,13,2,228—237,1988.
- [2] Dong Chaohua, Liu Quanhua, Li Guangqing and Zhang Fengying, The study of in-orbit calibration accuracy of NOAA satellite infrared sounder and its effect on temperature profile retrievals, *Advances In Atmospheric Sciences*, 7, 2, 1990.
- [3] Smith, W. L. et al., The Simultaneous Retrieval Export Package, Technical Proceeding of the Second International TOVS Study Conference, Ings, Austria, Published by CIMSS, University of Wisconsin, 224—253, 1985.
- [4] Eyre, J. R., On systematic errors in satellite products and their climatological mean values, *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 113, 279—292, 1987.

**THE ERROR CHARACTERISTICS OF METEOROLOGICAL
PARAMETERS RETRIEVED FROM SATELLITE REMOTE SENSING
MEASUREMENTS AND THE ERROR SIMULATION TESTS**

Zhang Wenjian

(*Department of Geophysics, Peking University, Beijing, 100871*)

Li Guangqing Dong Chaohua

(*National Satellite Meteorology Centre, SMA, Beijing, 100081*)

Abstract

Based on the error analyses of meteorological satellite remote sensing retrieval system, the error characteristics of meteorological parameters retrieved from satellite remote sensing measurements are described. Under the guidance of the error analyses, a series of simulation tests on the retrieval errors are carried out and the error characteristics are revealed quantitatively. These analyses and simulation tests can be used as a guidance for designing meteorological satellite remote sensing systems and for improving retrieval accuracy.