

大气红外间接遥测方程的估计解 和验前限制

黎 光 清

(国家气象局卫星气象中心)

提 要

在线性估计调整方法中研究如何考虑验前信息的方法,是发展估计算法的重要途径。为此,在文中根据十五通道理论权重函数和五个不同估计方法所得到的模拟数值试验结果,从估计模式所涉及的信息形式、不同形式验前限制的效应以及估计解的实际可解性等对估计解的精度和验前限制的内在联系进行了数值分析,确认 TPRD1 的解和验前信息之间具有最佳的统计结构。

一、目 的

在将卫星辐射测值转化成气象参数的反演问题中,如果只使用辐射测值而不考虑其它限制,纯粹作为一般的非适定问题处理,这个问题就不可能得解,或者得不到比较精确的解。具体说,例如在地球大气温度间接遥测反演中,期望根据辐射场光谱特性测值反演辐射传递方程得到温度廓线 $T(P)$,就会引起相当大的困难。因为在积分方程数值化中对积分步长的选取是任意的,试图用一组有限的辐射测值 $I(\nu_i)$ ($i = 1, 2, \dots, m$),反演温度随气压的连续变化,必然导致解的多值性。尤其是,当辐射测值出现噪声时,通过权重函数的变平作用,反演解变得极不稳定,因为在 $I(\nu)$ 中的小误差,可以引起在反演 $T(P)$ 中的大谬误。这是大气间接遥测非适定问题的两个基本特征,而不稳定性则是大气光学非适定问题的根本困难所在。反演理论和试验证明^[1],如果不对待求参数加以限制或调整,就得不到所期望的解。因此对待求参数必须给予充分的限制,通过引入验前信息可以将非适定问题转化成适定问题。所以在线性估计方法中研究如何考虑验前信息的方法是重要的。本文根据十五个探测通道理论权重函数和五个估计方法反演试验的结果,对各种不同形式验前限制矩阵(对称的,非对称的和对角的)的作用、估计解的实际可解性、估计模式涉及的信息形式以及线性解的精度等问题作了一些定量分析,目的在于揭示估计解和验前限制的联系,进一步分析改进的最佳有偏估计解(即 TPRD1 或 TPRD4,见下文)的若干基本性质。

1982年12月15日收到,1983年4月14日收到再改稿。

二、估计问题涉及的信息形式

使用估计调整方法,通常涉及三种不同物理意义的信息,即待估参数,验前信息和卫星辐射测值。在估计模式中所有这些都具有相似的数学形式,而且它们之间的随机联系不同就得到不同的估计算法。这三类信息通常与对称的协方差矩阵、对角的以及非对称形式的验前限制矩阵相联系,同时和验前平均及测值误差相结合。以估计调整求解大气光学的非适定问题所涉及的三类信息为例,可以概括如下:

1. 离散的待估参数

$$x_1 = F_1(b) \quad E\{b\} = \bar{b} \quad \sigma_b^2 = M$$

其中待估廓线 x_1 是一组未知的离散参数 b 的已知泛函 F_1 。待估参数的数学期望值为其平均值 $\bar{b}$ 。待估参数的方差 σ_b^2 可以是相当大的实数值 M 。

2. 作为限制的验前信息

$$x_2 = F_2(b) \quad E\{x_2\} = \bar{x}_2 \quad E\{(x_2 - \bar{x}_2)(x_2 - \bar{x}_2)'\} = S_{x_2}$$

式中验前信息包括待估参数的验前统计平均值 $\bar{x}_2$ 和验前信息协方差矩阵 S_{x_2} , 它们是具有已知协方差矩阵 S_{x_2} 的离散参数已知泛函的无偏估计或有偏估计, 角标 $'$ 表示向量 $(x_2 - \bar{x}_2)$ 的转置。

3. 辐射测值

$$x_3 = F_3(b) \quad E\{x_3\} = \bar{x}_3 \quad E\{(x_3 - \bar{x}_3)(x_3 - \bar{x}_3)'\} = S_{x_3}$$

测值 x_3 是离散参数 b 的已知泛函, 通常取成具已知误差协方差矩阵 S_{x_3} 的一个无偏或有偏估计。

在线性估计问题中泛函 F_1 、 F_2 、 F_3 所含的函数都是线性的, 但若其中任何一个函数是非线性的, 则估计是非线性的。

三、十五个通道的反演试验

根据十五个通道的一组归一化理论权重函数值(表1)和不同形式的验前限制矩阵,按下列估计算法

$$\hat{b}_1 = \mu_b + D_1 A' S_r^{-1} (R - A \mu_b) \quad (1)$$

$$D_1 = (A' S_r^{-1} A + S_b^{-1})^{-1} \quad (1a)$$

$$\hat{b}_2 = S_b A' D_2 R \quad (2)$$

$$D_2 = (A S_b A' + S_r)^{-1} \quad (2a)$$

$$\hat{b}_3 = S_b A' D_3 R \quad (3)$$

$$D_3 = S_b - Q \quad (3a)$$

$$Q = S_b A' (A S_b A' + S_r)^{-1} A S_b \quad (3b)$$

$$\begin{aligned} \hat{b}_i^{(n)}(T) = & \hat{b}^{(n-1)}(T) + D_1 \{ S_b [b(\bar{T}) - \hat{b}^{(n-1)}(T_0)] \} \\ & + A' S_b A [b(T) - \hat{b}^{(n-1)}(T_0)] \end{aligned} \quad (4)$$

以及

表 1 15 通道模拟的规范化权重函数

权重函数 通道	$P(\text{mb})$														
	1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	70	50	30	20	10
1	1.00000	0.98756	0.94490	0.82436	0.72885	0.60413	0.52025	0.44511	0.35095	0.24596	0.17742	0.12929	0.07914	0.03329	0.02691
2	0.98614	1.00000	0.98247	0.88793	0.79903	0.67409	0.59377	0.50550	0.40209	0.28430	0.20616	0.15076	0.09261	0.06247	0.03161
3	0.93063	0.98007	1.00000	0.95051	0.87718	0.75891	0.67925	0.58364	0.47014	0.33663	0.24596	0.18078	0.11161	0.07548	0.03828
4	0.73576	0.84419	0.93845	1.00000	0.97712	0.89509	0.82436	0.72885	0.60413	0.44511	0.33084	0.24596	0.15360	0.10447	0.05329
5	0.55783	0.68989	0.82664	0.97350	1.00000	0.96302	0.90937	0.82436	0.70059	0.52925	0.39933	0.29986	0.18914	0.12929	0.06628
6	0.32324	0.45299	0.61506	0.85569	0.95537	1.00000	0.98447	0.93041	0.82436	0.64924	0.50227	0.38350	0.24596	0.16953	0.08764
7	0.19915	0.30844	0.46284	0.73576	0.87810	0.98248	1.00000	0.97712	0.89509	0.72885	0.57524	0.44511	0.28931	0.20074	0.10447
8	0.09158	0.16479	0.28730	0.55783	0.73576	0.90980	0.97350	1.00000	0.96302	0.82436	0.67044	0.52925	0.35095	0.24596	0.12929
9	0.02306	0.05329	0.11929	0.32324	0.50367	0.73576	0.85569	0.95537	1.00000	0.93041	0.79548	0.64924	0.44511	0.31729	0.16953
10	0.00123	0.00470	0.01735	0.09158	0.19915	0.40601	0.55783	0.73576	0.90980	1.00000	0.94490	0.82436	0.60413	0.44511	0.24596
11	0.00002	0.00018	0.00123	0.01335	0.05124	0.16034	0.27295	0.44605	0.68337	0.93063	1.00000	0.95051	0.73891	0.58364	0.33663
12	0.00000	0.00000	0.00003	0.00123	0.00730	0.04043	0.09158	0.19915	0.40601	0.73576	0.93845	1.00000	0.89509	0.72885	0.44511
13	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00006	0.00123	0.00544	0.02306	0.09158	0.32324	0.61506	0.85569	1.00000	0.93041	0.64924
14	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00013	0.00123	0.01128	0.09158	0.28730	0.55783	0.90980	1.00000	0.82436
15	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00123	0.01735	0.09158	0.40601	0.73576	1.00000

$$\hat{b}_s = D_s A^T R \quad (5)$$

$$D_s = (A^* A + kI)^{-1} \quad (5a)$$

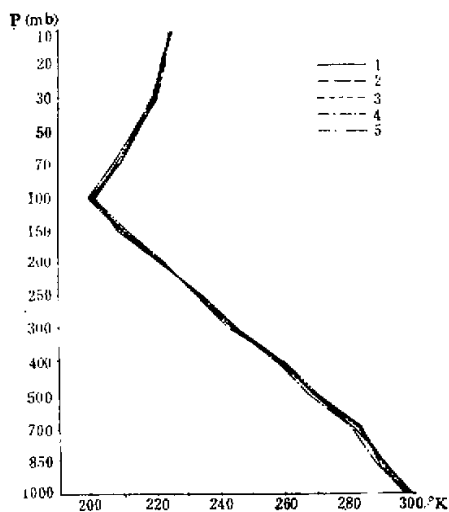


图 1a 十五通道反演结果

(1) 1979 年 9 月 4 日 20 时杭州无线电探空温度廓线 (2)TPRD1, TPRD4 反演 (3) TPRD2 反演 (4)TPRD3 反演 (5)TPRD5 反演

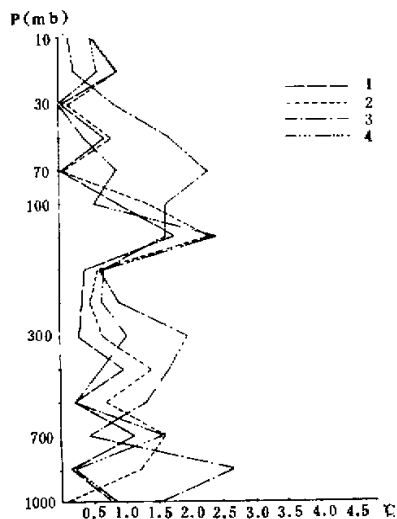


图 1b 反演和实况的温度绝对平均偏差

(1)TPRD1, TPRD4 (2)TPRD2 (3)TPRD3 (4)TPRD5

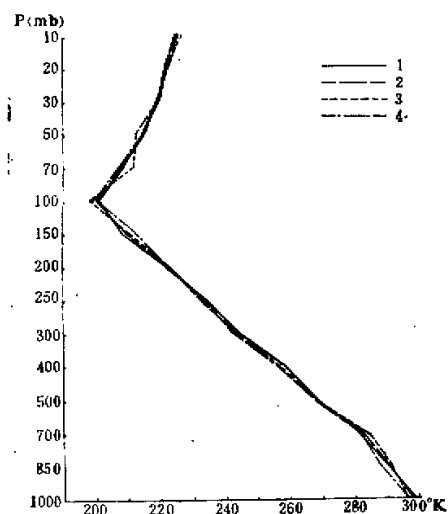


图 1c 十五通道非对称验前限制矩阵反演结果

(1)1979 年 9 月 4 日 20 时杭州无线电探空温度廓线 (2)TPRD1, TPRD4 反演 (3)TPRD2 反演 (4)TPRD3 反演

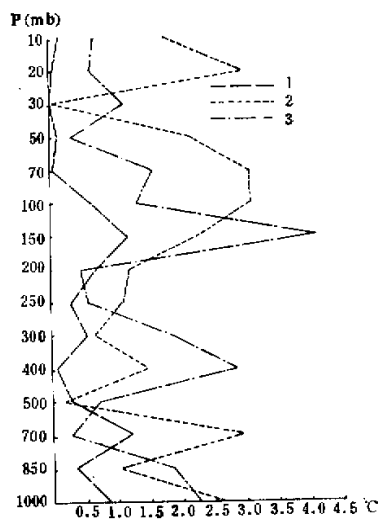


图 1d 反演和实况的温度绝对平均偏差

(1) TPRD1, TPRD4 (2) TPRD2 (3) TPRD3

表 2 温度廓线反演统计

按 15 通道反演的温度绝对平均偏差																	
估计调整方法	$P(\text{mb})$ 绝对平均偏差 ($^{\circ}\text{C}$) S_b 类型	15 通道理论权重函数最大值所在高度															整层总的 绝对平均 偏差 ($^{\circ}\text{C}$)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
		1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	70	50	30	20	10	
TPRD1	对 称	0.64	1.09	0.34	0.54	0.18	0.84	0.39	0.54	0.80	0.55	0.87	0.30	0.42	0.59	0.43	8.52
	非对称	0.51	0.66	0.50	0.54	0.84	0.45	0.72	0.92	1.06	0.68	0.99	0.66	0.35	0.42	0.44	9.74
TPRD2	对 称	1.52	1.73	0.58	0.45	0.53	0.73	0.36	0.49	1.14	0.80	1.23	0.24	0.64	0.99	0.53	11.96
	非对称	2.16	1.88	1.98	1.13	1.35	1.24	1.83	1.06	2.44	4.70	2.43	2.90	1.32	2.73	1.76	30.91
TPRD3	对 称	3.01	1.76	1.11	1.03	0.66	0.77	0.70	0.70	0.96	1.71	1.63	0.79	0.66	1.03	0.90	15.90
	非对称	2.45	2.62	1.23	1.95	1.76	0.98	1.04	1.31	3.65	2.12	2.02	2.20	1.12	0.55	1.64	25.58
TPRD4	对 称	同 TPRD1 对称类型															9.56
	非对称	0.39	0.66	0.51	0.54	0.84	0.47	0.73	0.92	1.07	0.57	1.00	0.66	0.34	0.42	0.44	
TPRD5	对 角	0.94	0.60	0.77	0.58	0.35	0.53	0.27	0.71	1.58	0.51	1.03	0.45	0.43	0.95	0.49	10.20
按 8 通道反演的温度绝对平均偏差																	
估计调整方法	$P(\text{mb})$ 绝对平均偏差 ($^{\circ}\text{C}$) S_b 类型	8 通道理论权重函数最大值所在高度												整层总的 绝对平均 偏差 ($^{\circ}\text{C}$)			
		1	2	3	4	5	6	7	8								
		1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	70	50		30	20	10
TPRD1	对 称	0.51	0.48	0.47	0.64	0.35	0.79	0.35	0.65	1.22	0.63	0.71	0.26	0.48	1.09	0.80	9.43
	非对称	1.81	3.55	1.14	2.25	1.52	1.41	1.38	0.65	2.09	1.02	1.02	1.55	0.80	1.07	1.40	22.75
TPRD2	对 称	0.40	0.92	0.76	0.77	0.52	1.01	0.57	0.84	1.95	0.57	1.15	0.58	0.40	1.02	1.08	12.54
	非对称	4.66	5.32	1.66	1.24	3.37	2.65	5.8	1.82	5.32	2.61	3.79	1.27	4.06	5.36	2.26	51.19
TPRD4	对 称	同 TPRD1 对称类型												12.28			
	非对称	同 TPRD1 非对称类型															
TPRD5	对 角	0.84	0.55	1.10	0.69	0.44	0.87	0.28	0.58	2.00	0.53	1.25	0.45	0.46	1.09	0.85	12.28

通过求解大气遥测方程,反演温度廓线。在上列诸式中 μ_b 是待估参数的验前统计平均; A 是权重函数矩阵; 角标 t 是矩阵转置; $S_b = E\{\epsilon\epsilon^t\}$, 表示测值误差协方差矩阵; $S_b = E\{(b - \mu_b)(b - \mu_b)^t\}$, 表示待估参数的验前信息协方差矩阵; R 是卫星辐射测值向量; $b(T_0)$ 是 Planck 函数的初始估值向量; I 是单位矩阵。在计算中为构造模拟辐射测值, 我们取测值误差 $\epsilon = 0.125 \text{ erg/sec.cm.sr.}$, $S_b = \sigma_b^2 I = 0.083$ 。在图 1 中示出反演廓线及其和探空实况的平均偏差。在计算中还考虑了三种不同形式的验前限制矩阵。为简便计, 我们分别称公式(1)–(5)为 TPRD1、TPRD2、TPRD3、TPRD4 和 TPRD5。其中 TPRD1 和 TPRD4 是我们首次提出使用的不同于国内外广泛流行的 TPRD2、TPRD3

和 TPRD5. 根据诸图所示从总的看使用以上诸法所得的反演结果都是稳定的,只是在反演精度上有比较明显的差别. 一般,考虑对称的验前信息协方差矩阵 S_0 优于在诸法 (除 TPRD5 外,因为它只取对角形的验前限制矩阵形式)中使用非对称的验前限制矩阵 S_0^* .

为了对以上五个估计方法进行数值分析,在表 2 中示出十五通道和八通道的绝对平均偏差,其中平均偏差是根据 1979 年 9 月 1—10 日十条探空温度廓线和相应的反演廓线构造的. 结合图 1 分析表 2,可将诸法的主要特点概括如下:

1. 表 2 (十五通道反演)示出不同估计方法的各层温度绝对平均偏差值表明选用方法都是可行的,其中 TPRD1 和 TPRD4 的偏差最小. 对称型 TPRD1 的总的绝对平均偏差为 8.52°C ,而非对称型 TPRD1 的相应值为 9.74°C ,前者比后者的偏差低 1.44°C . 对称型 TPRD1 每层的偏差为 0.57°C ,而非对称型 TPRD1 的相应值为 0.65°C . 非对称型 TPRD1 的特点表现在 $1000-850\text{mb}$ 之间的反演偏差低于对称型的相应值,但非对称型调整方法在对流层中部的偏差比对称型调整法的偏差大. 同时还注意到 TPRD1 和 TPRD4 对称型反演的精度相似,只是在非对称限制下 TPRD4 略优于 TPRD1. 我们认为,这是因为 TPRD1 所得的估计解已非常接近真解,因而在此估计解的基础上继续迭代,已无太显著的效果. 但须指出,非对称型 TPRD1 的反演结果比其它同类型的反演结果都有显著改善. 我们还认为,如果在此法中更合理地使用预报廓线和红外窗区高分辨辐射测值,有可能改善对流层下部的反演廓线.

2. 所有的对称型验前限制调整均优于相应的非对称型估计反演结果,其中突出的特点是 TPRD1 比其它方法更加适应非对称型的验前限制. 由于这一特点可望从其它资料中提取更多的有效信息. 由于 TPRD2 对非对称型验前限制的适应能力较弱,因而得到某些相反的结果,但 TPRD2 仍比 TPRD3 有改进.

3. 脊回归 (ridge regression) 类型 TPRD5 (包括与此相似的最小信息估计)的精度低于 TPRD1,但高于其它方法 (这和八通道的反演结果不同). 这个方法是当前广泛流行的一类有偏估计,也是 TPRD1 的一个简化方法,其特点是只要选得适当的调整参数 k ,就可以大大节约计算量,得到相当满意的结果. 在我们的试验中取 $k = 0.12345$ 得到的结果较好.

4. 在这些估计方法中比较差的是 TPRD3,即其估计量为

$$D_3 = S_0 - S_0 A' (A S_0 A' + S_e)^{-1} A S_0$$

有人认为使用 D_3 算子反演可能比 D_1, D_2 的精度要高些^[2],但是根据我们的试验结果,使用 TPRD3 得到的结果特别在对流层下部和较高层大气的偏差最大,这可能和此法的某些方差太小有关.

5. 比较表 2 中的两组偏差,明显看出十五通道的反演精度普遍优于八通道的结果,而八通道的结果又优于六通道的结果 (表 2 中未示出). 由此可知,如果能够控制测值误差,适当地增加通道可以得到更好一些的结果. 此与赵高祥^[3]的反演结果分析论断相一致,方差比较分析也证明了这一点 (见图 2).

总之,一般而论对称型验前限制的估计调整优于非对称型限制反演的结果. 但唯独非对称型的 TPRD1 和 TPRD4 对低层大气反演结果仍有一定改进.

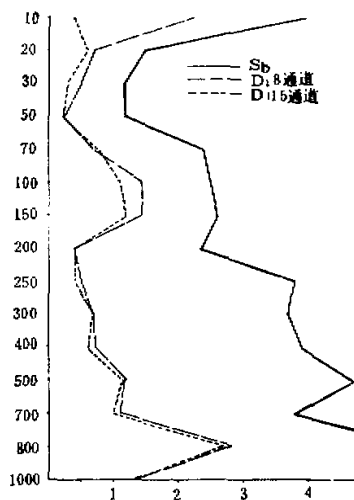


图2 S_b 的总方差和 D_1 的剩余方差比较, 方差单位: $mW \cdot m^{-2} \cdot Sr \cdot cm^{-1}$

四、估计调整的可解性分析

前节的反演结果表明, 使用估计调整方法求解大气间接遥测一类非适定问题, 是最佳的途径之一。其中特别是 TPRD1 得到普遍最好的结果。试验结果还表明不仅可以使用对称的、对角的、甚至还可以使用非对称的验前限制矩阵。这是因为在大气间接遥测反演中估计解 δ 对验前信息限制矩阵形式的选择不敏感有关^[4]。

现在有必要对不同方法的可解性条件作定量分析, 以揭示估计解存在的条件。如果下列诸频散矩阵的行列式

$$|D_1^{-1}| = |D_1^{-1}| = |(A'S_1^{-1}A + S_1^{-1})| \neq 0 \quad (6)$$

$$|D_2^{-1}| = |(A'S_2A + S_2)| \neq 0 \quad (7)$$

$$|D_3^{-1}| = |[S_3 - S_3A'(AS_3A' + S_3)^{-1}AS_3]| \neq 0 \quad (8)$$

$$|D_5^{-1}| = |(A'A + I)| \neq 0 \quad (9)$$

成立, 则由 TPRD1、TPRD2、TPRD3、TPRD4 和 TPRD5 所推断的全部待估参数都可唯一地被确定。上列(6)–(9)式分别称为不同估计调整的可解性条件。很明显, 根据表 3、4、5、6 示出的作用函数(其中未示出非对称型的作用函数)也完全证明 D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_5 的逆矩阵存在, 因此相应的所有估计量均满足解的唯一性条件。

由此可见, 如果在线性估计方法中适当考虑验前信息, 构造满足可解性条件的频散矩阵, 就可以求得唯一的估计解, 从而将非适定问题转化为适定问题。分析(6)–(9)式还可知, 估计解的有效性在相当大的程度上取决于对验前限制矩阵 S_0 (或 S_1^*)、待估参数的验前限制以及测值误差协方差矩阵 S_e 的选择和组合。因此, 只要在估计方法中探索改进使用验前限制的方法, 更适当地抑制噪声的扩张, 就还可能进一步提高估计解的精度。通过

表 3a 作用函数 D_1

$r(\text{mb})$		1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	70	50	30	20	10
$r(\text{mb})$	1	1.311	-1.583	0.034	0.416	0.083	-0.479	0.202	0.301	-0.404	0.402	-0.231	-0.018	-0.101	0.261	-0.149
	2	2.728	0.737	-0.737	-0.637	-0.279	0.771	-0.205	-0.342	0.693	-0.706	0.320	-0.076	-0.210	-0.258	0.114
	3	0.034	-0.737	1.007	-0.395	0.116	-0.122	0.116	0.072	-0.268	0.130	0.067	0.042	-0.134	0.018	0.036
	4	0.416	-0.637	1.007	-0.395	0.116	-0.122	0.116	0.072	-0.268	0.130	0.067	0.042	-0.134	0.018	0.036
	5	0.083	-0.279	0.116	-0.205	0.628	-0.207	-0.180	0.092	0.054	0.093	0.003	0.005	-0.106	0.061	0.016
	6	-0.479	0.771	-0.122	-0.366	0.207	0.660	-0.058	-0.214	-0.227	-0.066	0.290	-0.046	-0.047	-0.081	0.080
	7	0.202	-0.205	0.116	-0.177	-0.180	0.058	0.418	0.099	-0.405	0.041	0.016	0.047	-0.047	-0.028	-0.028
	8	0.301	-0.342	0.072	0.029	-0.092	-0.214	0.099	0.397	-0.117	-0.075	-0.098	0.034	0.143	0.045	-0.104
	9	-0.404	0.693	-0.268	0.100	0.054	-0.227	-0.405	-0.117	1.232	-0.716	0.015	-0.086	0.110	0.115	-0.114
	10	-0.402	-0.705	0.130	0.256	0.093	-0.065	0.041	-0.075	-0.716	1.139	-0.485	0.091	-0.194	-0.009	0.131
	11	-0.231	0.320	0.067	-0.325	0.003	0.290	0.016	-0.098	0.015	-0.485	0.652	-0.123	-0.076	-0.120	0.112
	12	-0.018	-0.076	0.042	0.087	-0.005	-0.046	0.047	0.034	-0.086	0.091	-0.123	0.157	0.001	-0.092	0.039
	13	-0.101	0.210	-0.134	0.095	-0.106	-0.047	0.016	0.143	0.110	-0.194	-0.076	0.001	0.295	-0.142	-0.060
	14	0.261	-0.258	0.018	-0.062	0.061	-0.081	0.022	0.045	-0.115	-0.009	-0.120	-0.092	-0.142	0.606	-0.408
	15	-0.149	0.114	0.036	-0.007	0.016	-0.080	-0.028	-0.104	-0.114	0.131	0.112	0.039	-0.060	-0.408	-0.434

表 3b 非对称作用函数 D_1^*

$r(\text{mb})$		1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	70	50	30	20	10
$r(\text{mb})$	1	-0.148	0.496	-0.326	-0.053	0.093	0.296	-0.349	-0.335	0.339	0.059	-0.002	0.122	-0.464	0.338	-0.031
	2	0.430	-0.605	1.129	-0.384	-0.966	-0.610	0.561	1.033	0.033	-0.700	-0.229	0.243	-0.759	-0.753	0.144
	3	-0.040	-0.345	-0.582	0.717	0.938	0.094	-0.591	-0.802	0.007	0.792	-0.073	0.004	-0.601	0.409	0.008
	4	-0.300	0.615	-0.260	-0.299	-0.146	0.274	0.410	0.090	-0.399	-0.162	0.182	-0.220	0.376	-0.132	-0.077
	5	-0.393	0.417	-0.554	0.015	0.732	0.175	-0.058	0.348	-0.649	0.363	0.883	-1.008	0.006	0.471	-0.241
	6	0.326	-0.263	0.535	-0.142	-0.830	-0.301	0.378	0.622	-0.270	-0.611	-0.404	0.310	-0.334	-0.463	0.123
	7	0.541	-0.714	0.286	0.176	-0.244	0.050	-0.357	-0.121	0.779	-0.100	-0.927	1.045	-0.392	-0.086	0.148
	8	0.102	-0.252	-0.171	0.248	0.477	0.096	-0.648	0.360	-0.433	0.214	-0.156	0.199	-0.429	0.205	0.052
	9	-0.863	0.874	0.463	-0.363	-0.362	-0.276	0.562	0.540	-1.018	0.317	1.026	-1.437	0.490	0.190	-0.193
	10	-0.417	-0.029	-0.710	-0.080	0.464	-0.251	-0.057	-0.465	0.439	-0.258	-0.550	0.949	-0.248	-0.271	0.192
	11	-0.172	0.052	0.210	0.143	-0.469	0.032	-0.325	0.353	-0.631	0.063	-0.598	-0.708	0.310	0.040	-0.123
	12	0.270	-0.404	-0.123	0.221	-0.409	-0.079	-0.444	-0.391	0.668	-0.035	-0.511	-0.520	-0.209	-0.037	0.070
	13	0.037	-0.099	0.010	-0.104	0.104	0.079	-0.187	0.108	-0.013	0.061	0.075	-0.118	0.126	0.011	-0.082
	14	-0.413	0.445	0.421	-0.369	-0.385	-0.086	0.460	0.240	-0.366	-0.018	0.135	-0.111	-0.140	-0.271	0.124
	15	0.285	-0.204	-0.343	0.259	0.151	0.028	-0.174	-0.179	0.212	-0.011	-0.101	0.091	0.075	-0.240	-0.208

表 4a 作用函数数 D_1

$i(\text{mb})$	1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	70	50	30	20	10
$i(\text{mb})$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1000	6.2031	-4.8067	-3.1324	-0.0466	1.3815	1.6562	0.8864	-0.5488	-1.8538	-0.9988	0.7430	1.1942	-0.1285	-0.8038	0.0970
850	-4.8097	8.0116	-3.0729	-0.9677	0.1791	0.7682	0.5459	-0.1056	-0.8383	-0.5400	0.5299	0.5943	-0.0524	-0.4042	0.0458
700	-3.1289	-3.0781	9.2784	-2.1234	-1.4212	-0.4851	0.0085	0.3849	0.4507	0.0846	-0.1759	-0.1782	0.0342	0.1097	0.0172
500	-0.0481	-0.9650	-2.1237	8.4544	-3.8804	2.6555	-1.2014	0.6906	2.0976	1.0575	-0.7650	-1.2247	-0.1118	0.8048	-0.0926
400	1.3858	0.1769	-1.4274	-3.8750	7.6002	-3.5979	-2.0522	0.1718	2.0730	1.2867	-0.7071	-1.3198	0.0770	0.8703	-0.0892
300	1.6522	0.7697	-0.4770	-2.6636	-3.5968	8.5424	-2.8579	-1.4724	0.1676	0.6822	-0.0429	-0.4633	-0.0393	0.3179	-0.0154
250	0.8847	0.5493	0.0061	-1.2005	-2.0506	-2.8600	9.1093	-2.8062	-1.8767	0.2674	0.4930	0.4721	-0.0889	-0.2749	0.0448
200	-0.5478	-0.1080	0.3849	0.6939	0.1692	-1.4725	-2.8042	8.0030	-4.4149	-1.8094	0.8062	1.4935	-0.0341	-0.8987	0.0808
150	-1.8521	-0.8396	0.4500	2.0972	-2.0742	0.1688	-1.8796	-4.4140	6.1072	-3.6765	-0.0268	1.5690	0.2505	-0.9052	0.5004
100	-0.9977	-0.5404	0.0836	1.0574	1.2877	0.6815	-0.2683	-1.8074	3.6777	7.6720	-3.1973	-1.3681	0.4433	0.6022	-0.1937
70	0.7423	0.3303	-0.1755	-0.7647	-0.7077	0.0428	0.4937	0.8056	-0.0266	-3.1973	6.9654	-4.3026	-0.6233	1.2135	0.0012
50	1.1932	0.5952	-0.1774	-1.2252	-1.3204	-0.4632	0.4733	1.4921	-1.5699	-1.3684	4.5026	6.7512	-2.7897	0.3811	0.6248
30	-0.1283	-0.0525	0.0342	0.1116	0.0771	-0.0392	-0.0889	-0.0342	0.2505	0.4434	-0.6233	-2.7898	6.6841	-4.6107	0.5241
20	-0.8032	-0.4049	0.1093	0.8052	0.8706	0.3177	0.2757	-0.8976	-0.9056	0.6023	1.2134	0.3810	-4.6108	6.4423	-2.4930
10	0.0970	0.0459	-0.0172	-0.0926	-0.0893	-0.0155	0.0449	0.0808	0.0046	-0.1937	0.0013	0.6248	0.5241	-2.4930	1.9605

表 4b 非对称作用函数数 D_2^*

$i(\text{mb})$	1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	70	50	30	20	10
$i(\text{mb})$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
1000	5.8642	-4.4466	-2.3017	0.1658	0.7474	0.6768	0.3730	-0.1132	-0.6004	-0.4078	0.2081	0.3682	-0.0247	-0.1445	0.1620
850	-4.8979	8.2738	-2.5974	-0.9173	-0.2736	0.1581	0.2452	0.1774	-0.0638	-0.1857	-0.0332	0.1091	0.0128	-0.0277	0.0744
700	-2.8883	-2.9670	9.2530	-2.2888	-1.5965	0.5801	0.0012	0.4675	0.5797	0.1037	0.2513	-0.2192	0.0862	0.1267	-0.0819
500	0.6329	-1.1736	-2.9600	8.0234	-3.5367	1.8992	-0.2544	0.4710	1.2409	0.5310	-0.3576	-0.5932	0.2590	0.3460	-0.4579
400	2.1209	-0.1982	-2.5294	-4.3182	8.1608	-2.5512	1.4433	-0.1297	0.9570	0.4706	0.4706	-0.5217	0.3659	0.3773	0.6588
300	1.9308	0.3843	-1.2203	-2.7838	-3.0499	9.2931	-2.4613	-1.6761	-0.5477	0.1185	0.0083	0.0207	0.3442	0.1523	0.6002
250	0.6471	0.3388	-0.0932	1.0083	-1.7559	-2.6807	9.2011	-2.8781	-2.0420	0.4063	0.4163	0.5142	0.1429	-0.1166	0.2430
200	-1.5055	0.0819	1.3593	1.2477	0.0685	-2.1306	-2.7284	8.1082	-3.8399	-1.3314	0.7662	1.0137	-0.3058	-0.5289	0.6029
150	-3.3013	-0.1070	2.4551	1.8227	1.1851	-1.2957	-2.7342	4.1948	7.1219	-2.6414	0.3769	0.8274	-0.9817	-0.7632	1.7988
100	-1.3946	0.0818	1.1241	1.1262	0.5610	-0.1412	-0.6971	-1.7211	-3.2108	8.2683	-2.6986	-1.6031	-0.6269	0.1137	1.2819
70	2.3892	-0.0319	-1.8072	-1.6805	-0.4714	0.7651	1.0898	0.1263	-0.1629	-3.9089	6.1680	-4.1789	0.5548	1.2649	-1.6202
50	3.4754	-0.1140	-2.6669	-2.4570	-0.7684	0.8634	1.4002	-0.7507	1.3564	-2.4297	-0.7867	6.9863	-0.7287	-0.2656	-2.0516
30	-0.6156	0.2726	0.7438	0.2419	-0.2512	-0.3803	-0.2419	-0.0541	0.1910	0.8207	-0.5087	-3.1334	5.8564	-4.3953	1.6458
20	-3.0668	0.2862	1.9388	-2.2671	0.9965	-0.4612	-0.8988	-1.2841	-0.9217	1.2537	1.5185	-0.6156	-5.5348	-1.5077	1.5007
10	-2.2942	0.5156	-1.1014	-1.7216	-1.0068	0.0416	0.9972	0.7744	-0.6306	-0.4083	-0.3771	0.9891	0.6587	-3.5123	1.9462

表 5 作用函数 D_1

$r(\text{mb})$		1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	70	50	30	20	10
$r(\text{mb})$	1	13.096	-10.567	-3.834	-1.883	-2.449	-0.587	2.239	1.687	-2.548	-0.087	-1.679	0.848	0.891	-0.762	0.990
	2	10.554	8.336	3.577	1.962	-2.709	-0.522	-2.225	-1.488	3.173	0.234	1.232	-0.960	-0.560	0.729	-0.710
	3	-3.832	3.573	0.777	-0.316	-0.016	-0.115	-0.199	-0.368	-0.332	0.251	0.879	0.001	-0.560	0.098	-0.392
	4	-1.882	1.960	-0.316	0.697	-0.322	-0.001	-0.240	-0.253	-0.040	0.230	-0.045	0.064	0.093	0.026	-0.386
	5	-2.449	-2.710	-0.016	-0.322	0.777	-0.120	0.134	-0.213	-0.110	0.032	-0.434	-0.000	0.017	-0.056	0.609
	6	0.586	-0.525	-0.115	-0.040	-0.120	0.043	0.323	0.245	-0.545	0.117	0.020	0.006	0.014	0.005	0.028
	7	2.238	-2.226	-0.199	-0.240	0.134	0.323	0.328	0.262	-0.256	0.302	0.318	0.215	0.317	0.133	0.010
	8	1.687	-1.487	-0.368	-0.253	0.110	0.245	0.262	0.188	-0.188	0.313	0.408	0.192	0.283	0.124	-0.003
	9	-2.548	3.173	0.332	0.040	-0.110	-0.546	-0.256	0.188	0.314	0.313	0.408	-0.192	-0.375	0.281	0.044
	10	-0.087	-0.234	0.251	0.230	0.032	0.117	-0.302	-0.325	-0.313	1.116	0.277	-0.008	-0.388	-0.219	0.561
	11	-1.678	1.232	0.880	-0.045	-0.434	0.020	-0.317	-0.071	0.408	-0.277	0.287	0.102	0.182	0.108	-0.531
	12	0.847	-0.960	0.001	0.064	-0.000	0.006	0.215	0.053	-0.196	-0.006	-0.102	0.041	0.190	0.004	-0.181
	13	0.891	-0.560	0.093	0.017	0.014	0.317	0.283	-0.375	-0.375	0.388	0.190	0.242	-0.196	-0.247	0.559
	14	-0.761	0.729	0.098	-0.026	-0.056	0.005	-0.133	-0.124	0.281	-0.219	0.108	0.004	-0.196	0.585	-0.559
	15	0.990	-0.710	-0.393	-0.386	0.609	-0.078	0.010	-0.603	-0.044	0.561	-0.531	-0.181	-0.247	-0.559	1.813

表 6 作用函数 D_1

$r(\text{mb})$		1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	70	50	30	20	10
$r(\text{mb})$	1	4.549	-2.790	-1.787	-0.320	0.229	0.419	0.332	0.139	-0.081	-0.168	-0.084	0.011	0.059	0.029	-0.032
	2	-2.790	5.597	-1.988	-0.933	-0.335	0.134	0.246	0.234	0.098	-0.073	-0.093	-0.039	0.031	0.031	-0.013
	3	-1.787	-1.988	6.071	-1.576	-1.035	-0.329	0.007	0.242	0.280	0.085	-0.057	-0.081	-0.018	0.017	0.017
	4	-0.320	-0.933	-1.576	0.002	-1.925	-1.244	-0.713	-0.138	0.308	0.352	0.122	-0.061	-0.115	-0.043	0.066
	5	-0.229	-0.335	-1.035	1.925	6.024	-1.718	-1.267	-0.645	0.020	0.300	0.263	0.032	-0.139	-0.088	-0.070
	6	0.419	0.335	-0.320	-1.244	-1.718	6.169	-1.795	-1.593	0.693	0.098	0.307	0.188	-0.059	0.095	0.014
	7	0.332	0.246	-0.007	-0.713	-1.267	-1.795	6.191	-1.774	-1.242	-0.317	0.169	0.250	0.065	-0.046	-0.057
	8	0.139	0.234	0.242	-0.138	-0.645	-1.393	-1.774	6.091	-1.855	-1.013	0.221	0.209	0.262	0.079	0.155
	9	-0.081	0.098	0.280	0.308	0.020	-0.693	-1.242	-1.855	5.804	-1.963	-1.019	-0.129	0.451	0.248	-0.220
	10	-0.168	-0.073	0.085	0.352	0.390	0.098	-0.317	-1.013	-1.963	5.459	-2.175	-1.147	0.127	0.367	0.023
	11	-0.084	-0.093	-0.057	0.122	0.263	0.307	0.169	-0.221	-1.019	-2.175	5.546	-2.183	-0.946	-0.087	0.542
	12	0.011	-0.039	-0.081	-0.061	0.032	0.188	0.250	-0.209	-1.019	-2.175	5.546	-2.183	-0.946	-0.087	0.542
	13	0.059	0.031	-0.018	-0.115	-0.139	-0.059	0.065	0.262	0.451	0.127	0.946	-2.184	-2.184	-2.184	-0.778
	14	-0.029	0.031	0.017	-0.043	-0.088	-0.095	-0.046	0.079	0.288	0.367	0.946	-2.184	-2.184	-2.184	-0.582
	15	-0.032	-0.013	0.017	-0.066	0.014	-0.014	-0.057	-0.155	-0.220	0.623	0.542	-0.934	-2.298	-2.298	-3.029

比较分析表 3—6 和图 3 可知:

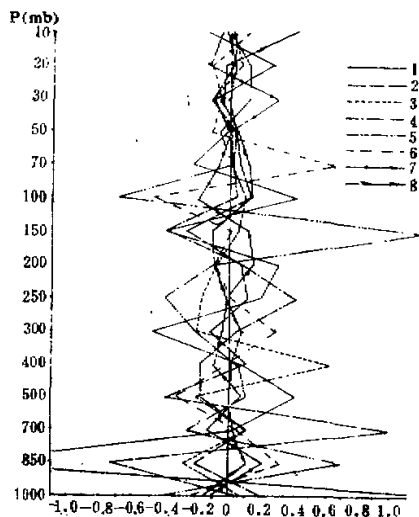


图 3 作用函数 D_1 的空间结构

1. 所有作用函数的对角元均具有方差的特征。通常较大的方差出现在接近地面的低层大气,随之在反演廓线中出现较大偏差。

2. 除 D_1 外其它作用函数都反映出显著的协方差,这表明 D_2 、 D_3 、 D_5 所描写的大气各层热结构之间还存在着较多的非确定因素。

3. 作用函数对角元绝对值的大小顺序为 $\|D_1(jj)\| < \|D_5(jj)\| < \|D_2(jj)\| < \|D_3(jj)\|$ 。同时 D_1 的方差随高度的增加而迅速减小,但 D_2 、 D_3 和 D_5 在各层上均有较大的方差。同时从图 3 上还没有发现 D_1 有误差扩张现象。

根据以上分析可以清楚看出,TPRD1 (包括 TPRD4) 和其它三个常用的估计方法比较有点突出的差别。第一,TPRD1 的算法结构比其它方法合理,从(1)式可知,所求的估计解是通过右端信息项(第二项)对待估参数的验前平均直接订正,给待估参数提供新信息。第二,TPRD1 是一个普遍的改进的最佳有偏估计,因为它的方差最小,反演精度最高。第三,TPRD1 的作用函数所含的协方差比其它方法小,因而能够提高整层大气的反演精度。第四,和其它方法相比,使用 TPRD1 容易实现对验前限制的改进;同时也比较容易考虑验前信息的非正常特性。但是,如果在验前信息中出现大错时,也会导致坏的反演结果。

五、问 题

从表 2 可知,即便是精度相当高的 TPRD1 和 TPRD4,在对流层下部接近地面和对流层顶区出现的偏差却仍然显著。其它方法在相应大气层出现的偏差则更大。产生这

这个问题的主要原因是云的影响,对流层顶温度梯度突然增大,以及权重函数的非确定性和变平作用,致使反演廓线的垂直分辨率变坏。因此,如果要得到满意的反演结果,除了要对反演方法研究外(即如何在线性估计中探索验前信息的新途径)。同时还要注意提高透过率算法的精度,尽量减小核函数的非确定性,从而得到充分窄的权重函数,这样有可能改善反演温度廓线的垂直分辨率,进一步提高整层大气温度层结的反演精度。

致谢: 本文插图均由杨建平同志绘制,作者表示深切的谢意。

参 考 文 献

- [1] 黎光清,地球大气温度间接遥测中的非适定问题(待发表)。
- [2] Rodgers, C. D., *Rev. Geophys. Space Phys.* **14** (4), 1976.
- [3] 赵高祥,改进温度反演精度和垂直分辨率的一个可能途径, *科学通报*, **25**(23), 1980.
- [4] Franklin, J. N., *J. Math. and Appl.* **31**(3), 1970.

THE ESTIMATION SOLUTION AND PRIOR CONSTRAINS OF THE ATMOSPHERIC INDIRECT INFRARED REMOTE SOUNDING EQUATION

Li Guangqing

(Center of Satellite Meteorology, NMB)

Abstract

The method using the prior constrains in atmospheric inversion is critically important to the development of estimation algorithm. Simulation for fifteen channels using five different estimation methods has been numerically carried out and the results are present in this paper. The analysis of the correlation between the accuracy in estimation solution and the prior information of various types of matrices (symmetrical, non-symmetrical, and diagonal) has shown that TPRDI solution has the optimum statistical structure.