

东亚地区气象参数卫星遥感 反演理论和方法研究 I: ISPRM 和 SRRM*

黎光清 张文建 董超华 张凤英
张丽霞 冉茂农 罗东风 王保华

(国家卫星气象中心,北京,100081)

摘 要

文中对 10a 来改进的同步物理反演方法 (ISPRM) 实践与发展进行了总结。在不违背先验信息和卫星测值之间独立的原则下,所做的改进都是针对这类非适定反演问题的欠定性 (under-determinedness) 进行的。由适定反演理论知道,正演是反演的基础,又是卫星辐射率测值输入和反演结果输出之间的桥梁。为了获得好的正演,就必须竭尽可能充分利用一切可以使用的先验信息,把非适定反演问题转化成适定的反演问题,从而通过 Ridge 回归或 Bayes 反演过程,把先验信息、理论模拟信息和卫星探测信息三者最佳地结合起来,以最大限度减少这类反演问题的欠定性对数值解的影响。

关键词: 同步物理反演模式,欠定性反问题,先验信息,适定反演理论,真实性检验。

1 引言

为了发展同步物理反演方法 (SPRM)^[1],根据适定反演理论^[2],针对这类反演问题的欠定性,考虑东亚大陆包括青藏高原地形高度和探空测站分布,对引起 SPRM 反演误差的主要因素作了系统的数值实验和内部比较研究^[3,4],并由此建立了适于东亚地区温、压(位势高度)、湿参数的自洽物理同步反演模式和改进的同步物理反演方法^[5](简称 ISPRM)。改进的方面包括:(1)用自洽同步反演模式代替 Smith 等和 Fleming 等所建立的方法,1989 年以前使用的非自洽同步物理反演模式^[6,7];(2)为改善温、湿反演廓线垂直分辨率和反演精度,用前一天探空资料分析场代替气候初估场作初值;(3)因为好的反演归因于好的正演,为了减小透射率误差而对正演亮温作了统计拟合修正;(4)在高原地区对反演模式通过积分限引入下垫面气压概念代替传统人为假定的海平面气压和温度以及递减率,利用高分辨率地形高度资料,实现了地面气压 P_s 的精确计算,初步合理地考虑了大陆地表和高原的地形高度效应;(5)根据 HIRS/2 探测通道对大陆地区大气辐射传输的敏感性分析,实现了对流层低层温、湿反演通道最佳选择;(6)改进了云参数算法以及云层以下

* 初稿时间:1998 年 6 月 10 日;修改稿时间:1999 年 1 月 21 日。

资助课题:国家自然科学基金资助项目(49794030#)和“95 国家重大天气灾害的形成机理和预测理论研究”项目(G1998040909#)。

湿度廓线修正^[8]。

上述的前 3 条为减弱这类反演问题的非适定欠定性提供了基本条件。在最近试验中又继续对上述后 3 条作了进一步改进,对这些改进拟在另文讨论。为便于说明问题,在表 1 中给出了 NOAA-12 卫星 TOVS 探测器通道光谱特征。

表 1 TOVS 探测通道光谱特征

HIRS/2 通道号	通道中 心波数 ($\text{c} \cdot \text{m}^{-1}$)	中心波长 (μm)	主要吸收成分	最大能量 贡献层	MSU 频 率 通道号 (GHz)	主要吸收成分	最大能量 贡献层	
1	668	15.00	CO ₂	30 hPa	1	50.31	窗区	地表
2	679	14.70	CO ₂	60 hPa	2	53.37	O ₂	700 hPa
3	691	14.50	CO ₂	100 hPa	3	54.96	O ₂	300 hPa
4	704	14.20	CO ₂	400 hPa	4	57.95	O ₂	90 hPa
5	716	14.00	CO ₂	600 hPa				
6	732	13.70	CO ₂ /H ₂ O	800 hPa				
7	748	13.40	CO ₂ /H ₂ O	900 hPa				
8	898	11.10	窗区	地表				
9	1028	9.70	O ₃	25 hPa				
10	1217	8.30	H ₂ O	900 hPa				
11	1364	7.30	H ₂ O	700 hPa				
12	1484	6.70	H ₂ O	500 hPa				
13	2190	4.57	N ₂ O	1000 hPa				
14	2213	4.52	N ₂ O	950 hPa				
15	2240	4.46	CO ₂ /N ₂ O	700 hPa				
16	2276	4.40	CO ₂ /N ₂ O	400 hPa				
17	2361	4.24	CO ₂	5 hPa				
18	2512	4.00	窗区	地表				
19	2671	3.70	窗区	地表				
20	14367	0.70	窗区	云				

10 a 来通过利用 NOAA 卫星资料所作的对比实验,特别是 1995 年初以来 ISPRM 与 SRRM 并行运行试验,结果表明前者优于后者,ISPRM 总的平均均方根误差(rms)已达到 2K,特别是突破了在有云条件下统计回归反演方法^[9](SRRM)不能反演湿度廓线的限制,以及对流层低层温度反演精度也明显优于 SRRM。这充分表明,ISPRM 是适于东亚大陆和青藏高原的反演方法,同时也验证了适定反演理论^[10]。

2 反演模式

可将无散射和处在局域热力平衡的辐射传输方程(RTE)及其初值形式分别写成

$$R = B(P_s)\tau(P_s) - \int_0^{P_s} B(P) \frac{d\tau}{dP} dP \tag{1}$$

$$R^0 = B^0(P_s)\tau^0(P_s) - \int_0^{P_s} B^0(P) \frac{d\tau^0}{dP} dP \tag{2}$$

上式中 R, B 和 τ 分别表示辐射率、Planck 辐射率和透射率, 其中上标 $()^0$ 表示该量的初值。如上所述, 在研究中取温、湿探空资料分析场作初值。 R^0 是正演遥感方程的计算值, 而 R^0 则是卫星辐射率测值。为简化表达式, 在上列方程中所有 3 个物理量都与波数 ν 相关, 及其对瞬时视场角 θ 的依赖性, τ 具有的光谱响应函数 Φ , 以及地表面热辐射固有的发射率 ϵ 和 ν 均未注出。

对方程(1)和(2)作扰动运算和分步积分, 有

$$\delta R = \delta B(P_s)\tau^0(P_s) + \int_0^{P_s} \delta\tau(p) \frac{dB}{dp} dp - \int_0^{P_s} \delta B(p) \frac{d\tau^0}{dp} dp \tag{3}$$

$$\delta R = \delta B(P_s)\tau(P_s) - \int_0^{P_s} \delta B(p) \frac{d\tau}{dp} dp + \int_0^{P_s} \delta\tau(p) \frac{dB^0}{dp} dp \tag{4}$$

上述两式均称为同步物理反演模式, 大同小异, 方程(3)由 Smith 小组在 80 年代初首创^[1], 方程(4)由 Fleming 小组构建模式^[7], 除了它具有多参数反演功能外, 同步物理反演模式 (SPRM) 还考虑了气温与水汽的相互作用以及不同波段分子间辐射传输的内在联系, 从而具有适应卫星协合遥感技术发展的协合反演潜力。后经 Fleming 小组的精心改进, 在 80 年代末在美国 NESDIS 用最小方差同步物理反演法 (MVSPRM)^[7] 取代了多年业务运行的回归反演法 (SRRM)^[9], 建立了多参数定量反演系统, 从而迈进定量遥感反演新阶段。还须指出, 在方程(3)或方程(4)中还有一点不足之处, 即都没有确切示出先验变量和待求变量的区别, 因而在数学表达式上都是非自洽的。为了克服 Smith 或 Fleming 反演模式在数学表征的不完备, 我们继而将式(3), (4)作适当运算, 得到下列新的自洽同步物理反演模式^[5,8]

$$\delta R = \delta R(P_s)\tau^0(P_s) - \int_0^{P_s} \delta B(p) \frac{d\tau^0}{dp} dp + \int_0^{P_s} \delta\tau(p) \frac{dB^0}{dp} dp \tag{5}$$

式中 $d\tau^0/dp$ 和 dB^0/dp 分别称为水汽和气温核函数, 须要在反演前, 用光谱参数和标准大气模式参数确定。方程(5)和 Smith 小组发展的新模式^[11] 类似, 以上 3 个模式均属第一类非线性 Fredholm 积分方程, 实际上是一类至今尚未完全解决的非线性非适定的反问题。根据正、反演的内在联系, 为了在不改变模式外形、只改变先验信息限制条件下实现与 SPRM 的内部比较。可将方程(5)中的扰动量函数用 Taylor 级数展开取其一级近似直接把它线性化, 便可得到下列线性自洽同步物理反演模式,

$$\delta T_B = K_T \delta T_s - \int_0^{P_s} K_T \delta T dp + \int_0^{P_s} K_w \delta u dp \tag{6}$$

式中

$$K_{T_s} = \beta_s \tau^0 = \left(\frac{\partial B(T_s)}{\partial T_s} \right)_{T=T_s^0} / \left(\frac{\partial B}{\partial T} \right)_{T=T_s^0} \tau^0;$$

$$K_T = \beta \frac{d\tau^0}{dp} = \left(\frac{\partial B(T)}{\partial T} \right)_{T=T^0} / \left(\frac{\partial B}{\partial T_B} \right)_{T_B=T_B^0} \frac{\partial \tau^0}{\partial p};$$

$$K_w = \beta \frac{\partial B^0}{\partial p} \frac{\partial \tau^0}{\partial u} = \left(\frac{\partial B(T)}{\partial T} \right)_{T=T^0} / \left(\frac{\partial B}{\partial T_B} \right)_{T_B=T_B^0} \frac{\partial T^0}{\partial p} \frac{\partial \tau^0}{\partial u}$$

式中 u 表示水汽含量, 通过静力方程可将 u 化为水汽混合比 q 。最后将方程(6)离散化后, 应用 Ridge 回归法^[4] 就可同步地分别求出地表气温 $T(P_s)$, 大气温度廓线 $T(p)$ 以及大气

湿度廓线 $q(p)$ 。

3 适定反演理论

对气象卫星大气参数的遥感反演而言,如方程(1)所示,所谓正演问题,就是根据透射率 τ 或核函数 ($K = d\tau/dp$) 和 B 计算 R ;反演问题则是由 K 或 τ 及卫星辐射率测值 R 算 B 。除云雨大气的正演问题外,如果 τ 或 K 是精确已知,则通常求解正问题的困难不太大,但解反问题的困难比解正问题大得多。其主要原因有 3 点:其一,待求泛函数 B 是 P 的连续函数,而当前卫星测值 R 只是 19 个红外探测通道的辐射率测值,因而遥感反演廓线的垂直分辨率差,以及遥感反演方程离散化分层的任意性,从而导致解的非唯一性。其二,由于受遥感技术水平限制,卫星探测器测值的有效信息含量不足和辐射仪灵敏度较差。其三,对遥感反演方程所用的某些探测通道内含的大气光谱机理,例如窗区的水汽连续性 (continuum) 和水汽线型问题,还未完全了解^[12],也就是对模拟实际大气辐射传输的 RTE 尚未完全认识,因而存在非确定性,以及解对核函数误差 (KFE) 的强敏感性^[13,14]。上述 3 点证实这类反演问题的非适定性,是由其特定的欠定性所决定的。即便是到了 EOS 三高 (高精度、高光谱和高空间分辨率) 遥感反演时代,虽然高光谱干涉仪 (HIS) 或高级红外探测器 (AIRS) 有上千通道用来探测大气参数,从而测值多于待求参数出现超定问题 (over-determined problem),在求解反问题上有所缓和,但因为云雨大气辐射传递机理的复杂性,以及为检验垂直分辨率真实性而求解第 2 类反问题所碰到的强非线性非适定问题^[15,16],仍将是三维定量遥感反演所面临的主要困难。

不同观点处理反演问题欠定性的方法很不一样。传统数学观点倾向于引用 Hadamard 的定解三原则对适定问题所作的定义,即如果解存在而不唯一或解不是测值的连续函数,则此问题是非适定问题 (ill-posed problem)。按 Hadamard 的论断,非适定问题没有物理意义。但是,近 30 多年来随着反问题数学理论和反演方法的蓬勃发展,由此发展起来的确定性算子调整* (deterministic operator regularization)^[17] 和统计调整^[18] 等反问题的应用数学方法,极大拓宽了反问题的数学理论和方法在众多领域的实用性,已经和正在解决所碰到的难题。正如 Moritz^[16] 和 Tarantola^[18] 所指出的,当今求解反问题的观点是:不适定问题具有十分有意义的“适定外延”,这就是对待求参数的非确定性引入先验信息,从而扩大欠定问题的可解域。如对大气遥感这样强欠定问题所提出的适定反演理论和方法,就是对待求参数引入与卫星辐射率测值独立的先验知识,从而将它转化为适定问题^[2]。适定反演理论的实质就是通过 ISPRM 模式在求 Bayes 估计或 Ridge 回归解的反演过程中,精心地把卫星观测信息、先验信息和正演辐射率信息最佳结合起来,从而最大限度地减少欠定性对反演解的影响,提高反演精度。20 年来的反演实践已证实这是一条解决非适定欠定问题的根本途径^[2,5,19]。不仅如此,还可利用适定理论来估计核函数误差对反演解的影响^[14],由此可见,反问题理论应该从观测技术与观测资料和物理模拟的不确定性的思索中不断得到发展,这也是提出非适定问题的适定反演理论的思想基础。

* regularization 按 Tikhonov^[17] 的原意是指反问题的正则解或正则方法,这里我们依应用数学观点将其意译为调整。

4 先验信息

从适定反演理论知道,正演问题是对近实际大气辐射率的模拟。一切物理反演问题始于正演。特别是因为这类非适定反问题的欠定性质,尤须注重改善正演的精度。这样,第一是要有尽可能精确的温、湿廓线作为反演的初值 $B^0(P)$ 和 $q^0(p)$;第二是要求尽可能有足够精确的,特别是对流层下层的透射率 $\tau^0(P)$;从而才有可能获得相对精确的辐射率 R^0 。因而反演过程把初估值、通道透射率和正演有机地联结在一起。对于物理反演而言,可以认为,没有精确的正演不可能得到精确的反演结果。从上述两点就可清楚看出在卫星遥感反演中完善地使用先验信息的重要性^[5,18,19]。

4.1 最佳初估场的建立

根据中国探空测站分布实际,同时考虑到气候统计温、湿场和数值预报场本身存在若干非确定性和垂直分辨率的问题。在业务反演对比试验中,选用卫星实时观测的前一天探空资料客观分析场作为 ISPRM 反演的初估值。按卫星过境 3 条轨道观测覆盖区域,确定相应探空资料分析场的覆盖范围,包括 $10^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $70\sim 140^{\circ}\text{E}$ 大部分东亚地区。应用快速 Barnes 方法对上述地区内的温、湿探空资料做客观分析,得到图示地区均匀网格点的三维初值数据库。网格步长为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$,在垂直方向温度廓线分 15 层(从 1000hPa 到 10hPa),湿度廓线分 10 层(1000hPa 到 100hPa),位势高度与湿度分层一致。

定义反演块由 3×3 个扫描点组成,由其中心点经纬度位置确定相应的客观分析网格点。提取温、湿初值廓线,然后将 15 层温度廓线插值到 40 个 TOVS 反演层上。10 层湿度廓线也依反演要求插值到 1000hPa 以上的 20 层反演层上。

4.2 正演亮温误差的统计修正

由于反演问题的欠定性质,卫星探测的辐射率存在误差,需要修正。修正亮温误差有透射率调整法,即用可调的透射率函数,通过与卫星辐射率值拟合运算,达到修正亮温的目的。试验表明这种方法的效果不够理想^[4]。比较好的途径是直接拟合估计卫星辐射率测值和晴空条件下正演亮温值之间的统计偏差^[3],达到修正卫星观测亮温的目的,此法的可靠性由晴空亮温判释的准确性而定。

4.3 地面气压 P_s 的精确计算

地形高度直接影响温、湿参数的空间分布。每个反演点的平均海拔高度是按该点所在反演块高分辨率($16\times 16\text{km}^2$)数字地形资料库确定。由于数字地形网格点通常不是正好和 TOVS 反演点相吻合,因此在确定初估廓线后还应单独确定地表初估值包括 P_s 。

由于地形高度和地表热状态参数都是通过 P_s 引入遥感方程,同时对方程(6)的正演或反演都直接涉及计算 P_s 的精确性问题。由多元大气压高公式导得 P_s 为

$$P_s = P_0 \exp \left[\frac{g}{R} \int_{Z_0}^{Z_s} \frac{dZ}{T_0 - \gamma T(Z - Z_0)} \right]$$

其中 Z_s 是某反演点所在地面海拔高度,在 Z_s 处的气压和温度为 P_s 和 T_s ,距 Z_s 点最邻近的标准气压层的气压和温度为 P_0 和 T_0 ,相应的所在高度为 Z_0 , γ 是从 Z_0 到 Z_s 的温度递减率, g 和 R 分别为重力加速度和干空气常数。我们发展的 ISPRM 模式是以探空资料的客观分析为基础,按反演视场内的数字地形文件参数所确定的平均海拔高度 Z_s 来确定离下表面最近的标准气压层。从探空分析场廓线提取 P_0 , T_0 和所在的高度 Z_0 ,并用插值法确定递减

率,使其最接近实际的温度递减率。反演试验证明,在高原地区用此方法取代原模式中用气候值确定下表面气压,加上其他改进使得低层大气参数的反演精度比其他反演方法,诸如美国 NESDIS 最小方差同步物理反演法最新发表结果^[20] 亦有明显改进。

5 反演结果和真实性检验

对大气参数反演结果的真实性的检验,通常是使用无线电探空温度廓线和露点廓线作为判定反演质量的标准。因两者都具有各自的非确定性,因此这种检验只有相对意义。所以国际上把这种检验结果称为反演和无线电探空值的均方根偏差(RMSD),而不称误差。

5.1 ISPRM 和 SRRM 的偏差比较

按东亚大陆高原范围,将反演网格值与时间和空间距离最近的探空值匹配,最后得到按纬圈平均的反演廓线与探空温、湿廓线的均方根统计偏差。为检验 1992 年以来物理同步反演准业务运行的稳定性和精确性,作为用 ISPRM 取代 SRRM 的根据,取 1995 年 9 月 15 日至 11 月 15 日两个月 NOAA-12 卫星探测资料为样本,分别计算 SRRM 和 ISPRM 与探空观测的统计偏差。表 2 给出了两种方法包括有云条件下反演的统计偏差。

表 2 包括有云条件下两个月的反演结果与探空对比的平均均方根偏差 RMSD
(物理反演 ISPRM,回归反演 SRRM)

类别\气压(hPa)	1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	70	50	平均
温度(K)	14462	23014	27145	29522	29242	28845	28341	27094	27694	25042	15778	15262	24283
物理 RMSD	1.36	1.97	1.85	1.80	1.80	1.82	1.84	1.81	1.82	2.20	2.10	2.12	1.92
回归 RMSD	2.47	2.51	2.18	2.03	1.99	2.10	2.23	2.32	2.23	2.35	2.13	1.99	2.21
厚度(m)	10645	26599	28446	29928	29614	29600	28888	27990	26415	16813	15992	24573	
物理 RMSD	14	21	25	23	21	13	17	18	29	28	23	21	
回归 RMSD	12694	25284	27090	27221	26620	26752	26142	25261	23331	12983	12959	22394	
相对湿度(%)	10974	20719	24353	29173	28774	25800							23299
物理 RMSD	8.1	12.5	16.6	26.4	27.9	35.1							21.1
回归 RMSD	9218	11489	16037	17884	17439	14899							14494
物理 RMSD	10.6	14.0	16.4	26.1	27.6	35.5							21.7

分析表 2 结果看出:

(1)在标准气压层上,温度反演和探空廓线匹配样本已达 2.9 万多个,有足够的代表性。在使用同样多的无线电探空样本的条件下,ISPRM 物理反演所获得的大气温度和位势厚度与探空的匹配样本,比 SRRM 回归反演所获得的大气温度和位势厚度与探空的匹配样本平均多 12%,而温度的匹配样本 ISPRM 反演比 SRRM 反演多 46%。这充分说明用物理反演所获得的廓线比回归反演明显增多,表明 ISPRM 在有云条件下也有较好反演能力,而 SRRM 则完全失掉反演能力。

(2)在 50hPa 高度以下 ISPRM 反演气温的平均均方根偏差为 1.92K;在 700hPa 以

下 ISPRM 湿度廓线反演的 RMSD 为 12.4%，特别是其中还包括了云天的反演结果。物理温、湿反演比回归反演的 RMSD 分别低 0.3 和 2%，由此可知 ISPRM 反演精度的提高，主要是它的协合反演功能和云下反演廓线修正^[8]以及低层反演通道最佳选择^[5]的结果。

5.2 ISPRM 反演场检验

TOVS 反演资料图像化的目的有二，其一是为了进行三维的真实性检验和资料同化，其二是便于直接将反演产品用于天气学分析预报、数值天气预报和气候研究。

作为个例在图 1(见封三)中分别给出 ISPRM 反演的 500hPa 位势高度场(1995 年 9 月 24 日 22 时 44 分—25 日 02 时 18 分 GMT)和 500hPa 探空位势高度场(1995 年 9 月 25 日 00 时 GMT)与叠加的 HIRS/2 第 10 通道水汽云图(图 1a)，从 ISPRM 反演的 500 hPa 温度场(1995 年 9 月 24 日 22 时 44 分—25 日 02 时 18 分 GMT)和 500hPa 探空温度分析场(1995 年 9 月 25 日 00 时 GMT)与叠加的 HIRS/2 第 8 通道长波窗区云图(图 1b)，反演的 200 hPa 位势高度场(1995 年 9 月 25 日 22 时 44 分—26 日 02 时 18 分 GMT)和由此高度场计算的地转风场(图 1c)以及 500 hPa 反演位势高度场(1995 年 10 月 12 日 23 时 15 分—13 日 02 时 35 分 GMT)计算的地转风场(白色风矢)和探空风场(蓝色风矢，1995 年 10 月 12 日 00 时与叠加的第 10 通道水汽云图(图 1d)。

分析图 1a 可以看出，在东亚大槽区位势高度场和探空位势高度场形势相当一致，而在大槽西北出现槽、脊位向一些偏差，同时三轨水汽云层分布也和天气系统位置相当吻合。分析图 1b 还可以清楚看出 ISPRM 反演温度场与探空温度分析场形势相符。分析图 1 云层，清楚看出水汽云图比长波窗区云图的层次结构清楚。反演计算的风矢量与位势高度场形势一致，并与探空观测的风矢量基本吻合。

5.3 与美国 NESDIS 业务物理反演比较

图 2 是国家卫星气象中心(NSMC)ISPRM 区域模式反演的温度廓线与探空温度廓线的均方根偏差廓线(实线数据取自表 2, 平均样本数为 24283 条廓线)与美国国家大气海洋局、国家环境卫星信息服务局(NESDIS)公布的最新业务系统全球模式的温度反演偏差(平均样本数为:30°N~30°S:136 条廓线,30~90°N:92 条廓线)的比较。可以看出 NSMC 的结果比 NESDIS 在洋面上的(30°N~30°S)的结果差。但在大陆地区明显优于 NESDIS 在 30~90°N 区域的反演结果。而 NSMC 的反演结果大多在大陆上空。因此, NSMC 的业务反演精度是可与 NESDIS 相比拟的。

6 结论和问题

根据中国探空站实际布局和反演问题非适定的欠定性质,确定目前用卫星观测前一天 00 时(世界时)探空温、湿资料的客观分析场作反演的初值,而不使用数值预报场或气候场作初值。并用与卫星观测最近的探空资料客观分析作为反演结果真实性检验依据,是在现实条件下合理的最佳选择途径。从最近 Westwater^[19]对大气温湿参数被动遥感反演中,使用探空资料作为初值的重要性作了完全透彻的分析。看来即便在 21 世纪无线电探空资料仍然会发挥它的重要作用。应该把卫星遥感和探空观测看成是相互益彰的工具。

从长期的各种比较实验包括内部比较试验结果,清楚看出同步物理反演模式的先进性,不只是可以快而精地同时反演出大气温度、湿度和地表温度,而且更内在地讲它实际

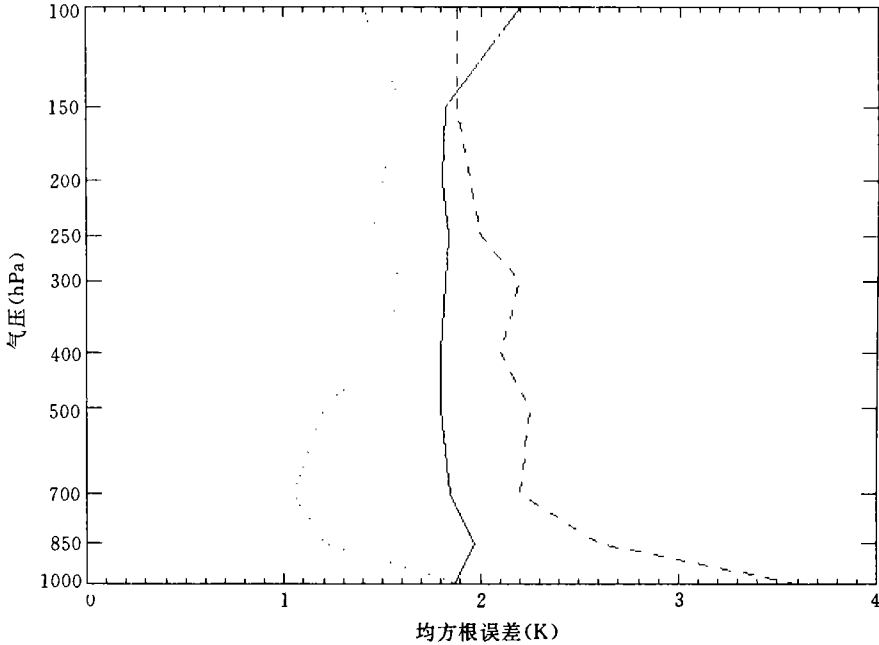


图 2 改进的同步物理温度反演结果与美国 NESDIS 反演精度比较
(实线:10°S~60°N;点线 30°N~30°S;虚线 30°N~90°N)

上考虑了 $15\mu\text{m CO}_2$ 和 $6.7\mu\text{m}$ 水汽吸收带之间辐射传输的内在联系和辐射能量的相互作用。因为按变分原理还可把遥感方程写成

$$\delta R = \tau_{cont}\tau_{sw}\delta B_s - \int_0^{P_s} \tau_w \delta B d\tau_{CO_2} + \int_0^{P_s} \tau_{CO_2} \delta \tau_w dB$$

式中 τ_{cont} , τ_{sw} 和 τ_{CO_2} 分别表示水汽连续系统地面水汽,水汽和 CO_2 透射率,因此在合理选择遥感通道核函数的条件下,通过 ISPRM 模式反演 $T(P)$ 的同时便考虑了水汽的效应,而在反演水汽时又自动考虑了 $T(P)$ 的贡献。TOVS 具有 HIRS/2、MSU 初级协合遥感功能,而 ISPRM 一类的同步物理反演模式,则具有相适应的协合反演功能。ISPRM 在对流层内温度反演特别是湿度反演精度显著,就清楚表明它的生命力。据此可以预期,具有协合反演性能的同步反演模式,将在 ATOVS 和 EOS 时代有更大更多的用途,当然还将面临求解非线性、非适定的反演问题。

参考文献

- 1 Smith W L. et al. The simultaneous retrieval export package. The Tech Proc Second Intern TOVS Study Conf (ITSC - II) Igl. Austria. Feb. 18-22. SSEC Univ. Wisconsin. 1985. 224-253
- 2 黎光清,董超华.地球大气红外间接遥测中的非适定问题.卫星气象文集.北京:气象出版社.1983.93~101
- 3 张文建,黎光清,董超华.卫星资料反演气象参数的误差分析及数值试验.应用气象学报.1992.3(3):266~272
- 4 黎光清,董超华,吴保锁等.东亚地区高分辨率物理反演方法的数值试验:内部比较研究.大气科学.1991.15(1):84~93
- 5 黎光清,张文建,董超华等.东亚地区气象参数同步物理反演方法的数值试验:SPRM 和 ISPRM.大气科学.1993.17(4):489~498

- 6 Smith W L. et al. The simultaneous retrieval of atmospheric temperature and water vapor profiles: Application to measurements with HIS. RSRM'87: Advances in remote sensing retrieval methods. A Deepak pub. 1989, 189—202
- 7 Fleming H E. et al. Minimum variance simultaneous retrieval of temperature and water vapor from satellite radiances measurements. Second conf on satellite meteorol remote sensing and appl. AMS. 1986, 20—23
- 8 董超华, 黎光清, 张文建等. 云参数和可降水总量的同步物理反演方程数值试验. 红外与毫米波学报, 1992, 11 (5): 395~400
- 9 Smith W L, Woof H M. The use of eigenvectors of statistical covariance matrices for interpreting satellite sounding radiometer observations. J Atmos Sci. 1976. 33. 1127—1140
- 10 黎光清, 张文建, 董超华. 气象卫星大气参数的适定反演理论. 定量遥感技术. 国家高技术信息获取与处理技术 (863~308) 专家组文集, 1995, 33~37
- 11 Smith W L, Woolf H M, Revercomb H E. Linear simultaneous solution for temperature and absorbing constituent profiles from radiance spectra. Appl Opt. 1991. 30 (9): 1117—1123
- 12 Strow L L, Smith W L. et al. Impact of a new water vapor continuum, and line shape model on observed high resolution infrared radiances. JQSRT. 1998. 59 (3~5): 308—317
- 13 Fleming H E. Crosby D S, Neuendorffer A C. Correction of satellite temperature retrieval errors due to errors in atmospheric transmittances. JCAM. 1986. 25 (6): 868—882
- 14 黎光清, 董超华. 应用 Bayer 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, 1988. 12 (1): 36~41
- 15 黎光清. 气象卫星被动定量遥感的反问题. 现状大气科学前沿与展望. 北京: 气象出版社, 1996, 166~169
- 16 Moritz H. General considerations regarding inverse and related problems. Inverse problems: Principles and applications in geoph tech. and medicine. proceeding intern conf. Akad Verl 1993. 11—23
- 17 Tikhonov A N. Arscnin V Y. Solutions of ill-posed problems. Winston and sons. 1977. 258
- 18 Tarantola A. Inverse problem theory: methods for data fitting and model parameter estimation. Elsevier. 1987. 629
- 19 Westwater E R. The remote sensing lecture: Remote sensing of tropospheric temperature and water vapor by integrated observing systems. BAMS. 1997. 78 (9): 1997—2006
- 20 Reale A L. et al. TOVS operational sounding upgrades: 1990—1992. NOAA Tech Report NESDIS 76. 1994. 67

THE STUDY OF RETRIEVAL THEORY AND METHODS FROM SATELLITE REMOTE SENSING FOR METEOROLOGICAL PARAMETERS OVER THE EASTERN ASIA I: ISPRM AND SRRM

Li Guangqing Zhang Wenjian Dong Chaohua Zhang Fengying Zhang lixia
Ran Maonong Luo Dongfeng Wang Baohua

(The National Satellite Meteorological Center, Beijing, 100081)

Abstract

A review of ten-year practice developing the ISPRM is given in the hope that some creative ideas can be drawn from it. The ISPRM stands for the improved simultaneous physical retrieval method (SPRM). The improvement upon the SPRM is associated with the under-determinedness of this ill-posed inverse problem. In the experiment, the precondition is observed that a priori information must be independent of the satellite measurements. The well-posed retrieval theory has told us that the forward process is foundation of the inversion, and it is the bridge between the input of satellite radiance and the output of retrievals. In order to obtain a better result from the forward process, one must take full advantage of every priori information available. It is necessary to turn the ill-posed inverse problem into the well-posed one, and then apply the Ridge regression or Bayes algorithm to find the optimum combination of the first guess, the theoretical analogue information and the satellite observations, so that the impact of the under-determinedness of this inverse problem to the numerical solution is minimized.

Key words: Simultaneous physical retrieval model. under-determinedness of ill-posed inverse problem. Priori information. Well-posed inverse theory. Verification.