

卫星遥感大气的层析 扫描反演方法

蒋 珺

荀毓龙

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100086) (中国科学院安徽光学精密机械研究所 合肥 230031)

摘 要 为了解决卫星气象的迫切需要, 提高低层大气常规大气参数测量的精度和垂直分辨率, 并兼顾中高层大气研究的需要, 借鉴了医学上的 CT 扫描反演的思路, 发展了一种“卫星层析扫描反演技术”即采用一种具有天底横向扫描; 沿轨多角度扫描的中低分辨率传感器, 利用 CT 反演方法, 可以在低层大气中获得 1—2 km 垂直分辨率 1—10 km 水平分辨率的温度、湿度廓线的三维分布, 能够探测较高层大气, 并能快速覆盖全球。

采用美国标准大气模式, 在理想情况下对探测器光谱通道进行了优化, 并利用美国 NASA 的实际温度廓线作了模拟计算(考虑了测量噪声)。反演结果表明, 理想的层析扫描反演方法的温度反演精度比传统方法显著提高了约 40%。

关键词 天底观测, 临边扫描, 层析扫描, 反演方法

1 引 言

大气及环境问题是 20 世纪的重大科学问题之一。为了充分了解并最终掌握大气环境演变规律, 需对全球大气进行长期、系统、精确的观察, 以便提供更为准确的从常规气象要素到其它许多大气物理参数约定量预报。基于有效辐射层原理的传统的正对地观测技术, 是广泛采用并行之有效的方法, 但它的温度反演精度只有 2—3K, 空间垂直分辨率只能达到 5—10 km, 也难以解决高层微量气体的探测问题^[1]; 70 年代以来至目前仍在发展的临边扫描技术^[2]; 能有效地解决高层微量气体的探测问题, 温度反演精度可达到 1—2K, 空间垂直分辨率为 1—5 km, 但它的技术难度也相对较高, 并且水平分辨率不好(约 200 km)。为了满足卫星气象的迫切需要, 提高低层大气常规气象参数的测量精度和垂直分辨率, 近年来国际上提出一种类似于医学上 CT 扫描的卫星层析扫描反演方法^[3,4], 期望解决低层大气中的提高精度及垂直分辨率, 以保证短周期覆盖并兼顾中高层大气研究需要的问题。本文将对卫星层析扫描反演方法的探测原理、反演方法进行一些尝试和探讨, 并给出计算机模拟的结果。

2 层析扫描探测原理

卫星层析扫描方法有点类似于医学发射 CT 技术。待探测的热辐射大气相当于人体

内辐射组织，卫星上所载之辐射计相当于绕人体旋转的探测器(或探测器阵列)。辐射计在卫星轨道平面内以各种不同角度和频率测量大气的热辐射，从测得的辐射数据中便可以重构出大气温度及各种吸收气体成分垂直分布的截面。在沿轨多角度扫描基础上再辅以横向的天底扫描，可以得到一个具有一定宽度的条带的三维分布，由于卫星相对于地球的进动作用，每隔一定周期便能得到一次全球大气结构的三维分布。

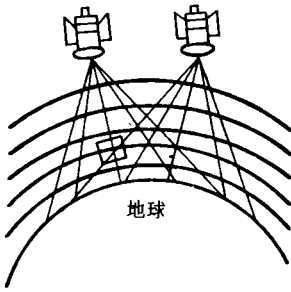


图 1 卫星层析扫描图

Fig.1 Satellite tomographic scanning method

2.1 投影路径的几何示意

如图 1 为卫星层析扫描的示意图。

与医学 CT 类似，所谓“投影”实际上是卫星上辐射计以一定方向、位置和频率测得的大气辐射。若视角、位置和频率中有任何一个不同，则投影不同。测量投影时所沿着的几何视线即为“路径”。图 2 为卫星层析扫描遥感方法放大的几何示意图。

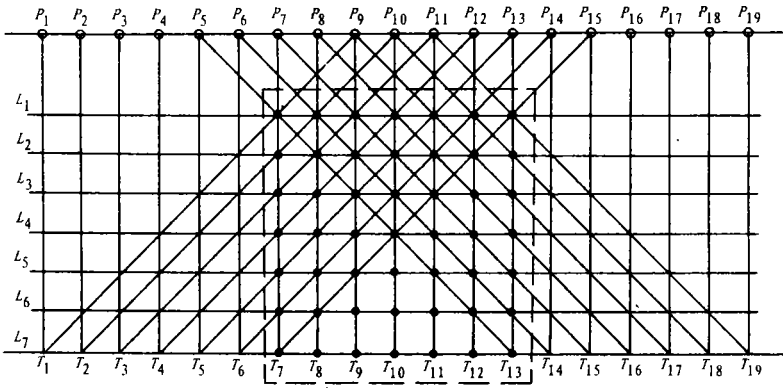


图 2 放大的层析扫描原理图

Fig.2 Detailed geometry of satellite tomographic scanning method

图 2 中，对角线上端标 P 的空心点表示卫星在轨道上的位置；标 L 的实心点表示分层大气的各中间层；标 T 的实心点表示视线终止于大气底部处。对于卫星观测，图中 L 点和 P 点永远不会重合，因为卫星轨道远高于大气层顶；而对于平流层高空飞机探测，L 点和 P 点则可能重合。

为说明方便起见，假定我们要反演图中方框区域内 49 个实心点所表示位置上的温度，或者说，要重构出包括这 49 个位置的一个温度截面(由 7 条垂直廓线组成)，从图 2 中可看出，仅从几何上考虑，共有 33 条路径的投影数据可供反演。但是，实际上，这 33 条投影路径上包括了不仅仅是方框中的 49 个点，还有框外的其它点(72 个)。为获得待

求的 49 个温度点，实际上还必须求解视线所涉及到的其它一些点，也就是说要用 33 条路径的投影数据来反演 121 个温度点。为了解框外的那些温度点，不妨再将框外点所在的垂直路径也考虑进来，总共有 45 条路径的投影数据可用于反演，当然，待反演的未知温度点数也增加为 133 个。这样做的好处是显而易见的。考虑到所用的通道数并不止一个，若增加一条路径，则总投影数可以成倍增加，也就是说关于一定数目待探测未知量的信息量将大大增多。对于 7 通道辐射仅考虑反演 121 个温度点时，总共可有 231 个投影用于反演；而考虑 133 个温度点时，则有总共 315 个投影用于反演。前者投影（辐射）数目为待反演温度的 2.0 倍，后者约为 2.4 倍；若通道数再增加一倍，则该比例还会翻倍，显然是后一种情况优越。

一般地，对于三角度观测，若初始截面内有 v 条温度垂直廓线待反演，每条温度廓线分为 t 层，采用 u 个通道探测时，对于前面所述后一种情况，可有总共 $u \times \{[2(t-1) + v] + 2[(t-1) + v]\}$ 个投影用于反演，总共 $t \times [2(t-1) + v]$ 个温度，即总的投影数 m 和待求温度数 n 分别为：

$$m = u \times (4t + 3v - 4), \quad n = t \times (2t + v - 2) \quad (1)$$

这样做的意义，由(1)式可知，对于 n 个待求的温度，可有 m 个投影方程用于求解。对于以前的各种方法，譬如正对地和临边观测，通常 $n < m$ ，即待反演的方程是欠定的，但是，如果我们选取 $u \geq t/2$ ，则 $m > n$ ，此时反演方程为超定方程组，方程组的这种质变必将引起反演解性质的相应变化。对于图 2 用 315 个方程反演 133 个温度，方程数比未知量数目多 182 个。若通道增加，则方程组超定程度还将急剧增大。卫星层析扫描方法的意义即在于通过多角度、多波段的测量增加了待反演截面的信息量。

2.2 投影的物理解释

同其它观测方法一样，投影实质上是测得的辐射度，可由辐射传输方程给出如下：

$$R(\nu, \theta) = B(\nu, T_s) \tau(\nu, \theta, P_s) + \int_{P_0}^{P_s} B[\nu, T(P)] \cdot \left[-\frac{d\tau(\nu, \theta, P)}{dP} \right] \cdot dP \quad (2)$$

或写成：

$$R(\nu, \theta) = B(\nu, T_s) \tau(\nu, \theta, P_s) + \int_{\ln P_0}^{\ln P_s} B[\nu, T(P)] \cdot \left[-\frac{d\tau(\nu, \theta, P)}{d \ln P} \right] \cdot d \ln P \quad (3)$$

式中， B 是温度 T 、波数 ν 时的普朗克函数， T 实际上又是 P 的函数， τ 是压强 P 到观测仪器处 P_0 之间的大气透射率， θ 是天顶角， T_s 、 P_s 分别表示地表温度和压强。

将(2)式中普朗克函数在温度平均值 $\bar{T}(P_j)$ 附近作泰勒展开并近似到一阶项，代入(3)式，可得：

$$R(\nu_i, \theta) = B(\nu_i, T_s) \cdot \tau(\nu_i, \theta, P_s) + \int_{\ln P_0}^{\ln P_s} B[\nu_i, \bar{T}(P_j)] \cdot \left[-\frac{d\tau(\nu_i, \theta, P)}{d \ln P} \right] \cdot d \ln P \\ - \int_{\ln P_0}^{\ln P_s} \frac{dB[\nu_i, \bar{T}(P_j)]}{dT} \cdot \frac{d\tau(\nu_i, \theta, P)}{d \ln P} \cdot d \ln P \cdot [T(P_j) - \bar{T}(P_j)] \quad (4)$$

等式右边的前两项实际上是由估值 T_s 、 $\bar{T}(P_j)$ 计算得的辐射值 $\bar{R}(v_i, \theta)$ 。于是有:

$$R(v_i, \theta) - \bar{R}(v_i, \theta) = - \int_{\ln P_0}^{\ln P_s} \frac{dB[v_i, \bar{T}(P_j)]}{dT} \cdot \frac{d\tau(v_i, \theta, P)}{d \ln P} \cdot [T(P_j) - \bar{T}(P_j)] \cdot d \ln P \quad (5)$$

上式可写成离散形式:

$$R(v_i, \theta) - \bar{R}(v_i, \theta) = \sum_{j=1}^l (\ln P_j - \ln P_{j-1}) \cdot \frac{dB[v_i, \bar{T}(P_j)]}{dT} \cdot \left\{ - \frac{d\tau(v_i, \theta, P)}{d \ln P} \right\}_{P=P_j} \cdot [T(P_j) - \bar{T}(P_j)] \quad (6)$$

令 $z_j = T(P_j) - \bar{T}(P_j)$

$$r_i(\theta) = R(v_i, \theta) - \bar{R}(v_i, \theta) \quad i = 1, 2, \dots, u$$

$$q_{ij}(\theta) = (\ln P_j - \ln P_{j-1}) \cdot \frac{dB[v_i, \bar{T}(P_j)]}{dT} \cdot \left[- \frac{d\tau(v_i, \theta, P_j)}{d \ln P_j} \right] \quad (7)$$

则有:

$$r_i(\theta) = \sum_{j=1}^l q_{ij}(\theta) \cdot z_j \quad i = 1, 2, \dots, u \quad (8)$$

其中 j 是压强层, i 是通道。

因为投影是辐射计在特定方向、位置和频率处测得的辐射, 故每个投影实际上都可表示成如(8)式那样的一个线性方程。

反演的任务是要从 m 个投影值即 m 个方程中解出 z_j , 进而得到温度分布 $T(P_j)$ 。

3 反演方法

反演方程组由 m 个形如(8)式的方程组成。对于倾斜路径, $q_{ij}(\theta)$ 不仅与某一条廓线上温度点有关, 还和其它廓线上点有关。因而, 每一条廓线并不是单独求出, 而是将所有廓线作为一个整个截面同时反演出来。一次即可得到若干温度廓线的整个二维分布, 这正是 CT 技术的特点。

因为要反演 v 条廓线, 还必须考虑其旁边的 $2(t-1)$ 条廓线, 故我们将这 $(2t+v-2)$ 条廓线矢量 $\vec{z} = (z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_t)^T$ 首尾相接, 构成一个大的组合矢量 \vec{X} 以表示整个截面。每个 \vec{z} 矢量为 t 维, 则 \vec{X} 为 $n = t \times (2t+v-2)$ 维矢量。

将(8)式中 $r_i(\theta)$ 和 $q_{ij}(\theta)$ 也作相应组合, 可分别得到一组合矢量 \vec{Y} 和组合矩阵 \vec{A} 。易知 \vec{Y} 是 m 维矢量, 由 $(4t+3v-4)$ 个 u 维小矢量构成, \vec{A} 为 $m \times n$ 维矩阵。

方程组可写成矩阵形式:

$$\vec{Y} = \vec{A} \vec{X} \quad (9)$$

其中每个方程的形式为：

$$y_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \quad i=1,2,\dots,m \quad (10)$$

其中 \vec{A} 是一个非常巨大的矩阵，直接对(9)式求解显然是不合适的。但是，由于我们对方程作了重新组合，若将 \vec{X} 看作是一条大廓线，则和正对地或临边的方程组相似，于是我们可以沿用正对地或临边情形的处理思路，用如下的线性迭代方法来求解：

$$\vec{X}^{K+1} = \vec{X}^K + \omega^K \vec{D} \vec{A}^T (\vec{Y} - \vec{A} \vec{X}^K) \quad (11)$$

其中，上标 K 表示迭代次数， T 表示转置矩阵； ω 是收敛参数； \vec{D} 为用来控制收敛的对角矩阵，其对角元素跟 \vec{A} 的元素构成有关。

由前文知，卫星层析扫描方法的数字模型可归结为，结定方程组 $\sum a_{ij} x_j = y_i, i=1, 2, \dots, m$, 求解 x_j 。

于是我们可以先任意假定一初始估值矢量 $\vec{X}^{(0)}$ ，采用下面迭代关系式来求解：

$$\vec{X}^{K+1} = \vec{X}^K + \omega^K \cdot \frac{y_i - \langle \vec{a}_i, \vec{X}^K \rangle}{\|\vec{a}_i\|^2} \cdot \vec{a}_i \quad (12)$$

式中 \vec{a}_i 代表矩阵 \vec{A} 的第 i 行矢量， $\langle \vec{a}_i, \vec{X}^K \rangle$ 为矢量内积， $\|\vec{a}_i\|^2 = \sum_{j=1}^n a_{ij}^2$ ， $\varepsilon_1 \leq \omega^K \leq 2 - \varepsilon_2$ ， $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为任意大于零的无穷小量。

因为实际测量中均含有误差，故 y_i 中有误差，因而我们并不是要找一个严格满足(10)式的解，(实际上也不可能找到)，而是找这样一个近似解，它使得由(10)式算得的 y 值在仪器测量误差的一个标准偏差范围内。实际上这和医学 CT 的代数重构算法思路是一样的。

4 模拟计算及结果分析

为验证层析扫描反演方法的可行性，我们采用美国标准大气模式和实际温度截面作了模拟计算。设想在平流层遥感飞机上进行层析扫描实验，飞机高度为 14km 以上，辐射计有 5 个通道，沿轨道方向以 $0^\circ, \pm 45^\circ$ 角测量 0—14 km 之间大气(均分为 7 层)的热辐射。

模拟包括原始截面扩展、权函数计算与通道优化、实际测量热辐射(含噪声)的模拟、反演模拟以及与正对地方法的反演结果对比。反演结果如图 3a、b、c、d 所示。

根据下式：

$$T_{RMS} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{T}_i(P_j) - T_i(P_j)]^2 \right\}^{1/2} \quad (13)$$

计算得的反演解的均方根误差如图 4(a—d)。

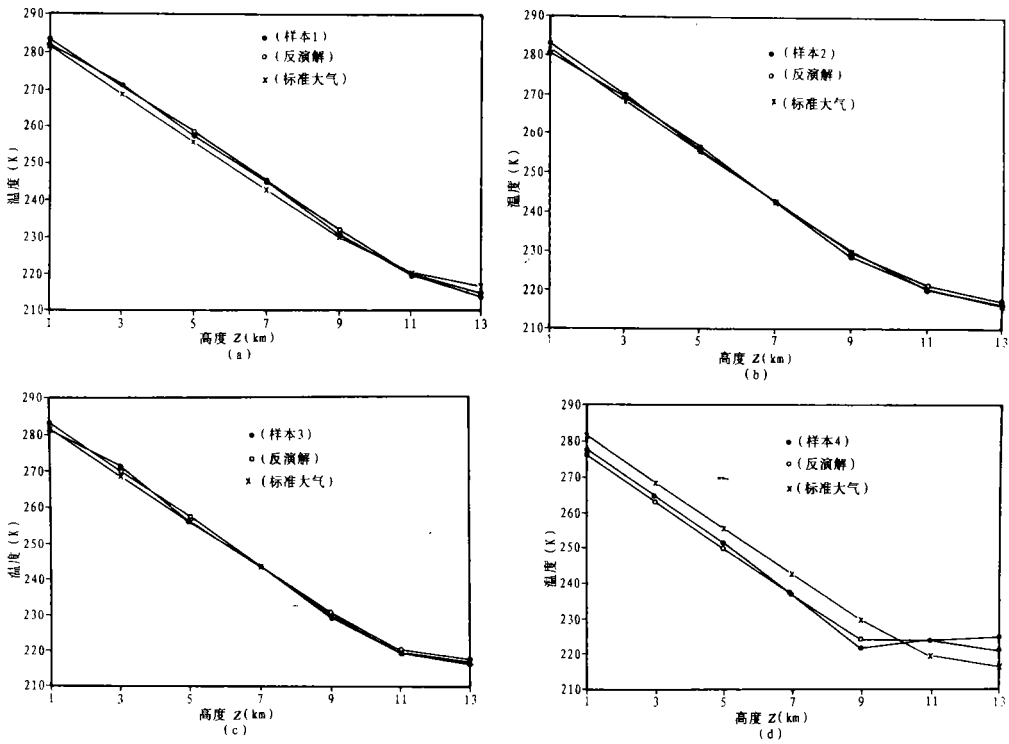


图3 (a—d) 层析扫描反演结果

Fig.3 (a-d) Simulation results of satellite tomographic scanning retrieval method

另外，我们按照通常的正对地情形，在和层析方法相同的条件下，用常规方法进行了反演，并将两种方法的结果作了比较(图4—6)。

图4a—d为反演得到的截面按大气层平均的均方根误差。曲线A表示采用三角度的层析扫描方法反演的结果；曲线B为采用正对地观测方法反演得的结果(即只采用层析方式中0°天底角观测)，它基本上代表了常规反演方法所能达到的程度。最上边标有Sample字样的曲线为初始估值截面的均方根误差，它表示了尚有待反演的温度信息的量级。

由图4—6可以看出，层析方法反演的平均精度为1.3K左右，而正对地方法只能达到约2.1K，反演的精度提高了近40%，应该说，这一提高是非常显著的。

从图中还可以看出，层析方法在边界层的反演精度比正对地方法要好，而通常边界层是以往各种方法最难解决的问题之一。这是不难理解的，因为层析方法对边界层上的点是以多个视角观测的，获得的信息量自然要多些。

图4d是对温度水平均匀分布截面的反演结果，显然，层析方法对于水平均匀的大气也是有效的，其精度甚至比其它几种水平非均匀情形要好，这说明反演的稳定性很好。由图4d还可以看出，对于水平均匀情形，层析方法的反演精度相对于常规方法的提高不如非均匀情形显著，这是由于此时层析反演方程组中的大部分方程都是相同的，方程组超定程度下降所致。

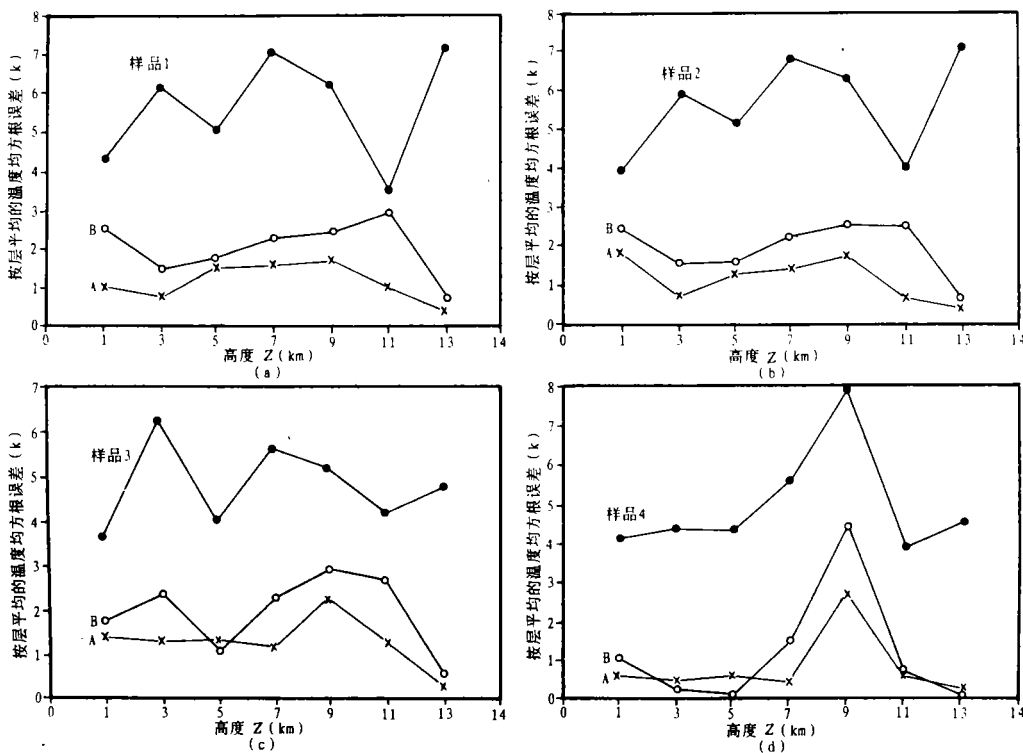


图 4(a—d) 反演解的均方根误差

Fig. 4(a—d) RMS error of layer-mean temperatures

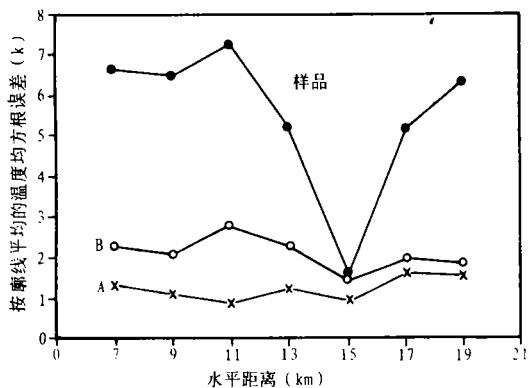


图 5 反演解的均方根误差 (按廓线取平均)

Fig. 5 RMS error of profile-mean temperatures

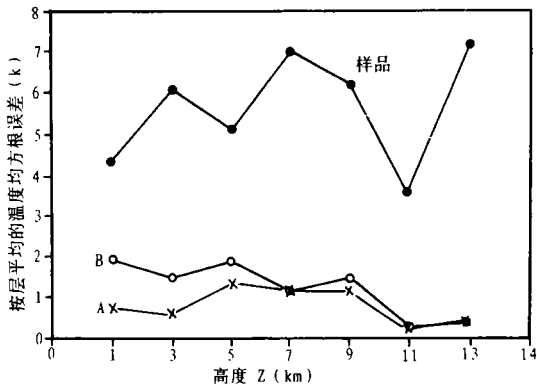


图 6 无测量噪声时的反演结果

Fig. 6 results of non-noise case

图 5 为反演得的截面按廓线取平均的均方根误差，实际上表示了水平方向的反演精度。可以看出层析方法亦优于常规方法。

从图 6 可以看出层析方法反演的最高精度为 0.8K。尽管没有测量噪声，反演解中仍有误差，该误差是由于模拟辐射值时对 Planck 函数只作了一阶近似。

计算中发现，初始估值廓线的选取，对最终反演解的精度有一定影响，且反演收敛

的速度跟初始廓线的精度有关。初始廓线越接近于真实廓线，则收敛的速度越快，反演解的精度越好。

5 结 论

本文的模拟计算假定了光谱通道是无限窄，投影路径无宽度。任何传感器均有一定光谱宽度和视场限制。为了更全面、更客观地评估层析方法，有必要在更接近于实际的情形下(如光谱分辨率、带宽限制、视场大小、大气日变化及视场中云“污染”影响等)对各种方法的反演结果作综合的比较，这方面的研究目前正在进行之中，有关结果将陆续发表。

最新的资料表明，经过多年不懈的努力，NOAA、NASA 的业务气象卫星(垂直观测)的分辨率和反演精度均有较大的提高^[51]，表 1 给出大气温度反演的一些指标和反演数据。

表 1 国内外情况比较

Table 1 Information of native and external development

| | | 数值预报要求的指标 | 80 年代(TOVS)水平 | 90 年代中后期 (ATOVS) 20 世纪初(OPQ+EOS) | 我国业务定量产品 | 理想情形层析方法 |
|-----------|--------|----------------------|---------------|----------------------------------|----------|----------|
| 温度反演精度(K) | | 0.5—1.5 | 2.5 | 1.0—2.0 | —2.0 | 1.3 |
| 空间分辨率 | 水平(km) | 局地10—50 全球 50—200 | —100 | 10—50 | —100 | 1—10 |
| | 垂直(km) | 0.5—1.5 | —10 | —5 | —5km | 1—2 |

综上所述，可以得出初步结论如下：理想情况下，层析扫描反演方法可以获得比常规正对地方法好得多的反演精度和空间分辨率。

参 考 文 献

- [1] Chahine, M.T. Invers Problems in Radiative Transfer: Determination of Atmospheric Parameters. Journal of Atmospheric Science. 1970, 27, 960—967.
- [2] J.C., Gille, J.M. Russell. The LIMS: Experiment Description, Performance and Results. J. Geophys. Res., 1984, 89 (D4) 5125—5140.
- [3] Fleming, H.E. Satellite Remote Sensing by the Technique of Computed Tomography. J. Appl. Meteorology, 1982, 27, 1538—1549.
- [4] Smith, K.T., F. Keinert. Mathematical Foundations of Computed Tomography. Appl. Opt. 1985, 24, 3950—3957.
- [5] EOS Reference Handbook. NASA GSFC. 1991, 147.

1) 董超华, 黎光清. 气象卫星遥感反演进展及其与地基大气探测的关系. 中国空间应用的回顾与展望. 1989. 年空间应用座谈会文集(王大珩编). 22—32.

作者简介

蒋 珺，男，生于 1969 年 2 月，助理研究员。1990 年毕业于山东大学光学系技术光学专业。从事遥感数据处理，卫星遥感的层析扫描反演方法及应用研究。

Atmospheric Remote Sensing by Satellite Tomographic Scanning Retrieval Methods

Jiang Jun

(Center for Space Science and Applied Research CAS)

Xun Yulong

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics CAS)

Abstract To improve the accuracy and vertical resolution of conventional atmospheric data profile at lower atmosphere, which is urgently required for satellite meteorology, and fulfil the requirement of upper atmospheric research, we adopt the idea of CT technique and develop a so-called "Satellite Tomographic Scanning Retrieval Method".

Using U.S. Standard Atmosphere, we have optimized the spectral channels in ideal condition. We have also conducted a numerical simulation based on a set of 7 real temperature profiles from NASA. The results of our simulations showed that the average improvement of the accuracy of retrieved temperatures over those using the conventional methods was about 40%, which was significant.

Key words Nadir observation, Limb scanning, Tomographic scanning, Retrieval methods