

有云时大气红外遥感及其反演问题

II. 反演试验研究

李 俊 曾庆存

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 本文前一部分提出了用相邻视场同步反演法处理有云时的反演问题。在这部分中, 我们将此方法应用到 TOVS 的模拟和实际观测资料反演中, 并提出了一种“广义 CO_2 分割法”来求取云高和云量的初始猜值。试验结果表明, 相邻视场同步反演法反演精度明显优于单视场反演法的精度。另外, 利用“广义 CO_2 分割法”可以得到较好的云顶气压和云量的初始猜值。

关键词 相邻视场 同步反演法 广义 CO_2 分割法

1 引言

我们对晴空情况下的反演问题作了研究和试验^[1~4], 以此为基础, 本文将研究有云情况下的大气红外遥感反演问题。在前一部分^[1]中, 我们分析了有云情况下反演问题所面临的挑战, 提出了一种相邻视场同步反演法处理有云时的反演问题, 该方法克服了传统的晴空订正法^[5]中误差放大问题, 能够提高有云时反演的稳定性。本文用这种方法对 TIROS-N 业务垂直探测器 (TOVS)^[6]模拟观测资料 and 实际观测资料进行反演试验。首先利用统计反演法从 4 个微波探测器 (MSU) 通道观测亮温中得到大气温度廓线和水汽廓线的初始猜值; 然后利用本文提出的“广义 CO_2 分割法”得到云高和云量的初始猜值。在反演模拟试验中, 我们除了用 3×3 相邻视场进行同步反演大气温度、大气水汽、表层温度、云量和云高外, 还用单视场反演法对同样的资料进行反演试验, 结果发现, 不管对于温度还是水汽, 相邻视场同步反演法的反演精度均优于单视场反演法的反演精度。实际反演的结果也表明, 3×3 相邻视场同步反演法具有很高的反演稳定性, 特别在处理有云反演问题时。

2 利用微波通道获取有云情况下大气温度廓线和大气水汽廓线的初始猜值

由于微波通道如 MSU、AMSU 和 MHS^[7]等对云有一定的穿透能力, 因此可用微波通道来求取有云大气温度、水汽廓线的初始猜值, 主要方法有两种:

(1) 统计回归法, 如文献[4]所示, 利用 TIGR 资料库作为训练样本, 得到大气

温、湿廓线与微波观测亮度温度之间的回归系数, 然后利用此回归系数进行统计反演。

(2) 物理反演法^[3,4], 在牛顿迭代法中, 只用微波通道来反演大气温度和水汽廓线, 当然还有表层温度, 在此反演过程中初始猜值为气候平均, 此反演结果作为下一步利用红外通道进行物理反演的初始猜值。

3 广义 CO₂ 分割方法求取云量和云高的初始猜值

有了大气温度、水汽廓线的初始猜值, 下一步就是如何获取云高和云量的初始猜值。本文发展一种利用长波 CO₂ 通道来求取单个视场内云高和云量初始猜值的方法, 根据方程

$$R = NR_{cd} + (1 - N)R_{cr}, \quad (1)$$

$$N = \frac{R - R_{cr}}{R_{cd} - R_{cr}}, \quad (2)$$

从 (2) 中可以看到, 对于每一个通道, 只要有了大气温度和水汽廓线, 并且给定云高, 就可以计算 R_{cr} 及 $R_{cd}(P_c)$, 进而得到相对应的云量 N ; 假定云量独立于波数, 即与通道无关, 因此, 给定了大气温度廓线、水汽廓线及表层温度后, 应选一云高, 使云量随波数的变化幅度最小, 即求取 P_c 使

$$\sum_{i=1}^{\bar{K}} \sum_{j=i+1}^{\bar{K}} [(N_i - N_j) / (N_i + N_j)] = \text{极小}, \quad (3)$$

其中 $\bar{K}$ 为所用 CO₂ 红外通道总数。此时得到的云高 P_c 即是云高的初始猜值。

一旦有了云高, 云量就很容易计算, 可根据下式计算云量

$$N = \frac{1}{\bar{K}} \sum_{i=1}^{\bar{K}} N_i. \quad (4)$$

该方法由于使用 CO₂ 通道, 我们称之为“广义 CO₂ 分割法”。

4 有云情况下反演模拟试验——HIRS+MSU

本试验用的数据是从 NOAA/NMC 40 km 宽度网格的中尺度模式中得到的, 该资料用于单层云试验, 总共有 3 条轨迹, 每条轨迹分白天和夜晚两组资料, 共 6 组, 如图 1 所示, 我们选择轨迹 A 的夜晚资料, 即 NA, 沿着轨迹的平均云覆盖为 50%, 云量分布从 20% 到 90%, 云顶气压从 850 hPa 到 100 hPa。在计算 9 个相邻视场的辐射强度时, 都用中间视场的大气状态, 在辐射传输模式中, 所有输入除了表层温度和云量外, 大气温度廓线、水汽廓线及云高在 9 个相邻视场中都一样。在计算微波亮度温度时, 考虑到微波通道视场范围比红外视场大, 因此 9 个相邻红外视场只对应一个微波视场, 具体计算时用 9 个红外视场的大气温度廓线平均值、水汽廓线平均值和表层温度平均值。NA 共有 45 个大视场 (每个大视场对应一个微波视场或 9 个相邻红外视场), 我们做以下三种情况的反演试验:

(1) 从相邻 9 个晴空红外观测值中同步反演共同的大气温度廓线, 共同的大气水汽

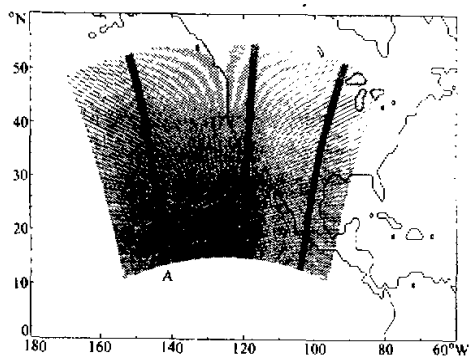


图1 试验资料轨迹图

相邻视场同步反演。

在所有反演过程中, 由于微波通道对云的穿透性, 我们用红外和微波通道一起进行反演, 即在方程组中增加若干微波通道, 当然上面已提到, 微波通道只能考虑单视场的亮度温度观测值, 即我们用 $9K + K_m$ 个观测值进行反演, 其中 K 是红外通道数, K_m 是微波通道数。在反演过程中, 初始猜值误差协方差矩阵基本上和晴空时一样, 只不过加入 2500 hPa^2 的云顶气压误差和 0.1^2 的云量误差。

图2是温度反演结果, 可以看到在有云情况下, 单视场(9个相邻红外视场平均)反演结果明显不如 3×3 相邻视场同步反演结果好, 一般要差 0.2 K , 同时也可以看出, 有云情况下的反演结果要比晴空情况下的反演结果差, 这说明在有云情况下反演问题的复杂性和困难性, 反演精度一般要比晴空情况时差。图3是水汽反演结果, 同样晴空时反演结果最好(12.17%), 有云情况下 3×3 相邻视场同步反演的结果次之(13.52%), 而有云情况下采用单视场进行反演其结果最差(18.13%)。图4是用 3×3

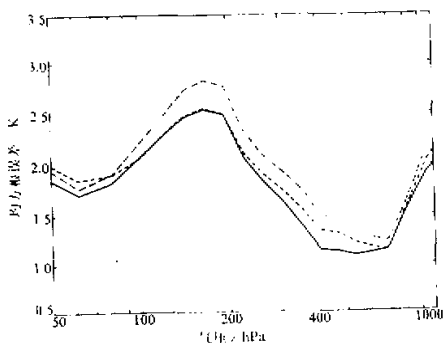


图2 从 TOVS 中得到 NA 45 条大气温度廓线反演的均方根误差 RMSE 统计结果
实线代表晴空时的反演结果, 较浅的虚线代表单视场反演结果, 较深的虚线代表相邻视场同步反演法的结果

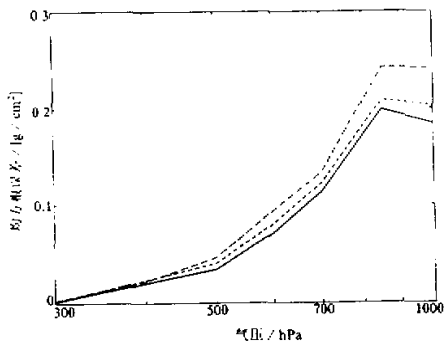


图3 从 TOVS 中得到的 NA 45 条大气水汽混合比廓线反演的均方根误差 RMSE 统计结果
实线代表晴空时的反演结果, 较浅的虚线代表单视场的反演结果, 较深的虚线代表相邻视场同步反演法的结果

廓线和 9 个不同的表层温度。

(2) 将相邻 9 个有云红外观测值进行平均, 从该平均红外观测值中反演共同的大气温度廓线, 共同的大气水汽廓线, 平均的表层温度, 共同的云顶气压和平均的云量, 也就是在有云情况下进行单视场反演。

(3) 从相邻 9 个有云红外观测值中同步反演共同的大气温度廓线, 共同的大气水汽廓线, 9 个不同的表层温度, 共同的云高和 9 个不同的云量, 也就是在有云情况下进行 3×3

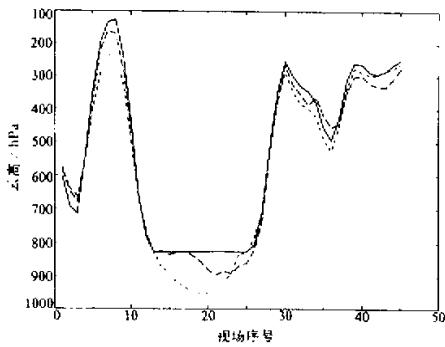


图 4 用 3×3 相邻视场同步反演法从 TOVS 中得到的 NA 45 个云高的反演结果
实线代表实际云高, 较浅的虚线代表由“广义 CO_2 分割法”得到的初始猜值, 较深的虚线代表反演结果

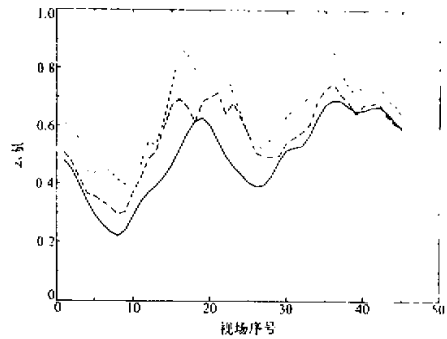


图 5 用 3×3 相邻视场同步反演法从 TOVS 中得到的 NA 45 个云量的反演结果
实线代表实际云量, 较浅的虚线代表由“广义 CO_2 分割法”得到的初始猜值, 较深的虚线代表反演结果

相邻视场同步反演法得到的 45 个云高的反演结果, 图 5 是相应 45 个云量的反演结果, 其中每个云量是 9 个相邻视场不同云量的平均值, 图 4 和 5 中的初始猜值是指用“广义 CO_2 分割法”得到的云高和云量, 可以看到, 反演结果与实测值比较接近, 特别是云量, 其误差从初始猜值的 18.8% 经迭代后降到 10.7%。

5 有云情况下反演实际试验

在本节中, 我们用 TOVS 实际观测资料进行有云情况下反演试验, 所用资料是 1994 年 12 月 3 号 (美国时间) NOAA-12 经过美国时的一条轨道。取 12:40 UTC 到 13:00 UTC 的一段, 用 MSU 得到初始猜值, 然后进行物理反演。

将反演结果与 12:00 UTC 的无线电探空 (RAOB) 资料进行比较, 图 6 是该轨道

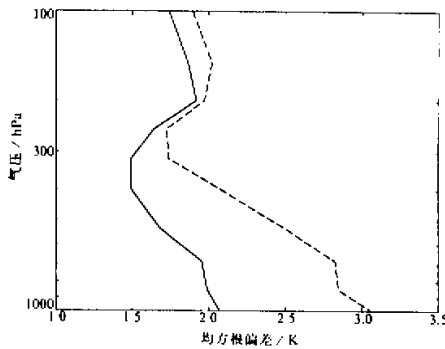


图 6 整个轨道温度反演的均方根偏差 RMSD 统计结果
虚线代表由微波通道得到的初始猜值统计结果, 实线代表反演统计结果

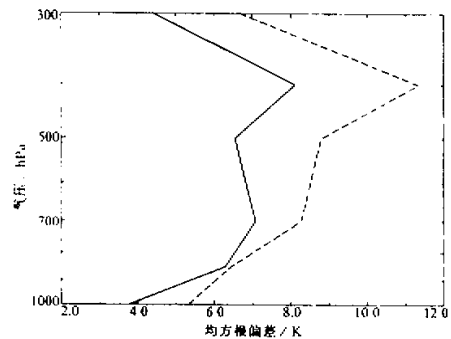


图 7 整个轨道露点温度反演的均方根偏差 RMSD 统计结果
虚线代表由微波通道得到的初始猜值统计结果, 实线代表反演统计结果

所有温度反演的均方根偏差 RMSD 统计结果, 从整个轨道反演的统计结果可知, 经物理反演后, 精度有大幅度提高, 特别在 300 hPa 以下, 这是由于 MSU 不能提供足够的低层温度信息, 因而初始猜值较差, 图 7 是相应露点温度反演的 RMSD 统计结果。同样可以看到物理反演法对初始猜值的明显提高, 特别是在 700 hPa 以上。

6 结论

(1) 相邻视场同步反演法不管对温度还是水汽来说, 其反演精度都比单视场反演精度高, 表明相邻视场同步反演法提高了反演的稳定性。

(2) 利用微波通道能够得到有云情况下较可靠的大气温度廓线和水汽廓线的初始猜值。

(3) 利用“广义 CO_2 分割法”可以得到较好的云顶气压和云量的初始猜值。

(4) 模拟试验和实际资料试验表明, 利用“广义 CO_2 分割法”和相邻视场同步反演法能够得到有云情况下较好的大气参数和云参数反演结果。

参 考 文 献

- 1 李俊、曾庆存, 1996, 有云时大气红外遥感及其反演问题 I. 理论研究, 大气科学, 20(3), 341~347.
- 2 曾庆存, 1974, 大气红外遥测原理, 科学出版社, 1~174.
- 3 李俊、曾庆存, 1996, 晴空时大气红外遥感及其反演问题 I. 理论研究, 大气科学, 20(1), 1~9.
- 4 李俊、曾庆存, 1996, 晴空时大气红外遥感及其反演问题 II. 反演试验研究, 20(2), 214~222.
- 5 Smith, W. L., 1969, An improved method for calculating tropospheric temperature and moisture from satellite radiance measurements, *Monthly Weather Rev.*, 96, 387~396.
- 6 Smith, W. L., et al., 1979, TIROS-N Operational Vertical Sounder, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 60, 1177~1187.
- 7 Aumann, H. H. and R. T. Pagano, 1994, Atmospheric Infrared Sounder on the Earth Observing System, *Optical Engineering*, 33, 776~784.

Study of Infrared Remote Sensing of Cloudy Atmosphere and the Inversion Problem. Part II: Experimental Study

Li Jun and Zeng Qingcun

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The inversion method was described in Part I of the paper for retrieval of the atmospheric parameters and cloud parameters from satellite observed infrared radiances under the cloudy condition. In this part, the method is applied to both simulated and real observed data inversion. Results show that the retrieval by adjacent spot simultaneous retrieval method is better than that by single spot retrieval method. In the retrieval procedure, the first guess of temperature and water vapor mixing ratio profiles are obtained from microwave channel observations, while the first guess of cloud top height and cloud amount is obtained from longwave CO_2 channel observations by a “generalized CO_2 slicing method”.

Key words adjacent spot retrieval method generalized CO_2 slicing method