

空对地微波遥感大气温度分布的数值试验

黄 润 恒

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文讨论了地表对微波测温核函数的影响,运用最优化技术,得到了一组基本上与地表特征无关的最优核。运用统计最优反演方法对50组模拟的微波辐射资料进行了反演,并讨论了观测误差对反演精度的影响。

在“微波探测大气温度分布的一个数值试验”^[1]一文中,我们曾经讨论了利用大气氧气5毫米吸收带的微波辐射从空间遥感对流层及平流层下部温度分布的可能性问题,提出了采用线性积分方程组核函数最优化技术,由八个通道的微波辐射亮度温度反演大气温度垂直分布的数值试验实例。在该文中,我们的注意力放在微波被动遥感大气温度分布的可能性以及最优化技术的应用上面,所以只考虑了大气向上发射的微波辐射这一项的贡献。但是在微波波段,地表不再能近似看成是完全的吸收体,它除了对微波产生一定的吸收而外,还将大气向下发射的微波辐射的一部分反射回到空间。本文在[1]的基础上,进一步考虑了这种反射作用对温度遥感的影响,同时还考虑了不同观测误差条件下的反演精度。结果表明,不同地表情况下的最优化核函数差别不大,这是采用最优化方法求解微波遥感大气温度分布的线性积分方程的又一个有利的方面。

一、地表反射对微波测温核函数的影响

考虑到地表对微波的反射作用以后,空对地微波遥感大气温度分布方程的完全形式为

$$T_{b_v} = (1 - R_v) T_s e^{-\int_0^\infty \alpha_v dz} + R_v e^{-\int_0^\infty \alpha_v dz} \int_0^\infty T \alpha_v e^{-\int_0^Z \alpha_v dz'} dz \\ + \int_0^\infty T \alpha_v e^{-\int_Z^\infty \alpha_v dz'} dz \quad (1)$$

其中 T_{b_v} 为从空间测得的地球-大气系统的总的微波辐射亮度温度, T_s 为地表温度, R_v 为地表对微波的反射率,它与地表的物理性质和化学组成有关,其典型的数值对于平静的海面约为0.5,对于陆地约为0.2—0,且随频率的不同, R_v 多少有些差别,(1)式中的第一项是地表的微波辐射经过整层大气的衰减以后到达空间的部分;第二项是大气各层的向下发射,被地表反射后,再经过整层大气的衰减而剩余的部分;第三项是大气的向上发射。

1979年4月12日收到修改稿。

若地表温度已知,或由红外窗区通道可以测出,再配合微波窗区通道可以确定地表在该频率上的比辐射率,从而进一步推算出其他微波通道上的地表比辐射率,此时第一项已知,将它移至方程左端,则有

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{bv} &= T_{bv} - (1 - R_v) T_s e^{-\int_0^\infty \alpha_v dz} \\ &= \int_0^\infty T \alpha_v [R_v e^{-\int_0^z \alpha_v dz} - \int_0^z \alpha_v dz' + e^{-\int_z^\infty \alpha_v dz'}] dz. \end{aligned} \quad (2)$$

与[1]比较,考虑到地表的反射作用以后,空对地微波测温方程的核函数为

$$W_v(z) = \alpha_v [R_v e^{-\int_0^z \alpha_v dz} - \int_0^z \alpha_v dz' + e^{-\int_z^\infty \alpha_v dz'}] \quad (3)$$

式中 $e^{-\int_0^\infty \alpha_v dz}$ 是整层大气的微波透过率。表一是对于美国 1962 标准大气在氧气 5 毫米吸收带的若干频率上的整层大气透过率。由于氧气 5 毫米吸收带的吸收较强,随着频率接近吸收带中心,大气变得不透明(如表 1 所述),地表的微波辐射以及被地表反射的大气

表 1 氧气 5 毫米吸收带上五个频率的整层大气透过率 τ_v

ν (千兆周)	51.7	53.9	54.9	56.0	59.4
τ_v	0.537	0.110	0.014	0.0002	0.0000

向下辐射到达不了空间,(1)式右端的第一、二两项不起作用,此时这些频率上的测温核函数与[1]差别甚微。图 1 是上述五个通道的测温核函数。由图可见,地表的反射只对 51.7 和 53.9 千兆周两个通道有影响,且随着高度的增加,地表的

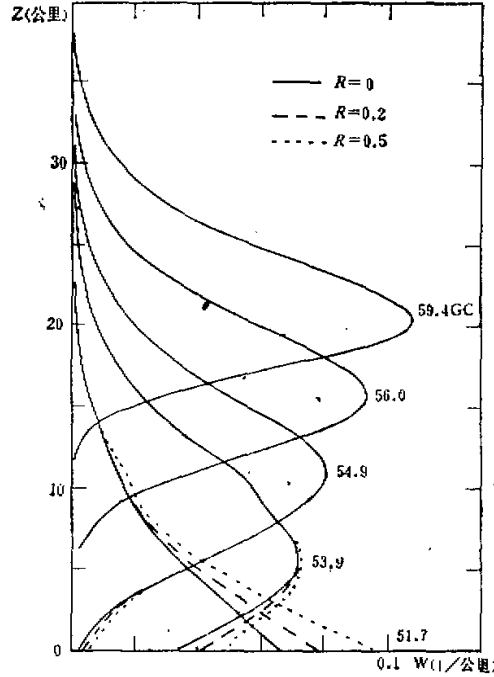


图 1 考虑地表反射后的微波测温核函数。

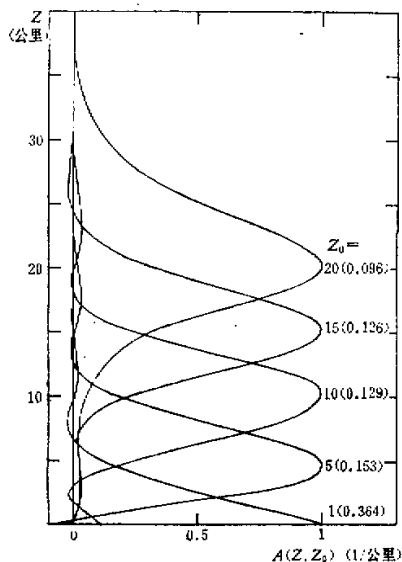
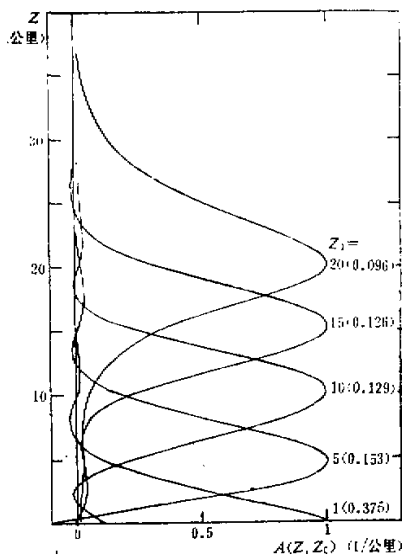
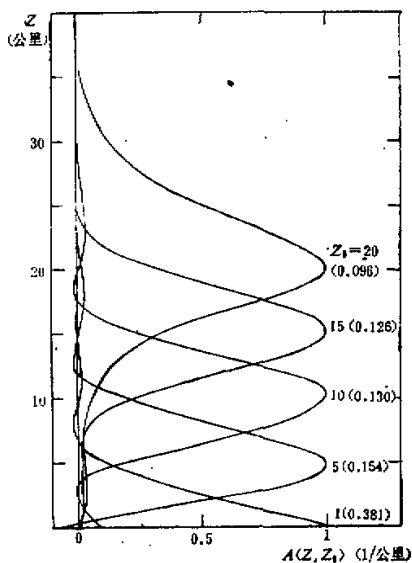
影响逐渐减弱。接近地表,最大影响约为 30%。

[1]中曾指出,利用线性积分方程组核函数最优化技术,可以改善反演解的空间分辨率和数值反演的稳定性。我们采用类似于[1]的方法,用上述五个通道,选定五个反演高度来进行试验。五个高度取 1, 5, 10, 15, 20 公里。图 2、3、4 是对于不同地表反射率的五通道最优核。若以

$$(\Delta z)^2 = \frac{\int_0^\infty (z - z_0)^2 [A(z, z_0)]^2 dz}{\int_0^\infty [A(z, z_0)]^2 dz} \quad (4)$$

作为最优核半宽度的指标,则 Δz 代表了该线性遥感系统的局地极限空间分辨宽度。(4)中的

$$A(z, z_0) = \sum_i a_i(z_0) W_i(z),$$

图2 $R = 0$ 时的五通道归一化最优核。图3 $R = 0.2$ 时的五通道归一化最优核。图4 $R = 0.5$ 时的五通道归一化最优核。

a_i 是根据最优化准则求得的一组系数。表 2 是各种地表反射率下的最优核半宽度。

图 2—图 4 以及表 2 说明了一个有意义的结果, 即虽然不同地表条件下原始的测温核函数在频率较低的两个通道上有明显的差别, 但是经过最优化处理以后, 最优化核函数基本上与地表反射率无关。这样就有可能用统一的最优核来反演不同地表上空的微波辐射。

表 2 各种地表反射率下的最优核半宽度,单位:公里

$R \backslash z_0$	1	5	10	15	20
0	1.11	1.90	2.23	2.29	2.97
0.2	1.10	1.87	2.19	2.24	2.98
0.5	1.08	1.86	2.18	2.24	2.98

射资料。关于这个问题,我们在以后的数值反演试验中还要讨论。

二、统计最优反演

为了考察观测误差对温度反演精度的影响,我们采用统计最优反演方法。该方法认为,由辐射量测温感温度分布是一种统计估计问题,根据温度场的验先统计特征以及观测误差的统计特征,可以构成反演算子,这种算子在统计上是最优的^{[2],[3]}。

选取某一参考温度(例如气候平均分布),记为 T_0 ,其对应的亮度温度为 T_{00} ,则经过最优化处理以后,(2)式变为

$$g'_i = \int_0^\infty T'(z) A_i(z) dz \quad (5)$$

下标 i 代表所选的最优化反演高度 z_{0i} 。

$$g'_i = g_i - g_0 = \sum_j a_{ij} (\tilde{T}_{z_{0j}} - \tilde{T}_{z_{0j_0}}) \quad (6)$$

$T'(z) = T(z) - T_0(z)$, 是实际温度分布对参考温度分布的偏离。

利用适当的数值求积公式,可将(5)式离散化,变为线性代数方程组,写成矩阵形式就有

$$\mathbf{g}' = \mathbf{A}\mathbf{T}' \quad (7)$$

其中 $\mathbf{T}'$ 是由选定的反演高度上的温度组成的温度偏差向量 $\mathbf{T} - \mathbf{T}_0$, $\mathbf{A}$ 是系数矩阵,它的元素由最优化核函数和数值求积公式所决定。由于最优核与地表的关系不大,在同一数值求积公式下,对于不同的地表,方程(7)的系数矩阵是非常接近的。

若已知辐射亮度温度的方差矩阵及其与温度场的协方差矩阵,则由(6)、(7)可以求出 $\mathbf{g}'$ 的方差矩阵 $\mathbf{S}_{g'}$ 以及它与 $\mathbf{T}'$ 的协方差矩阵 $\mathbf{S}_{Tg'}$, 从而根据统计回归分析,可以得到统计回归反演解

$$\hat{\mathbf{T}}' = \mathbf{S}_{Tg'} \mathbf{S}_{g'}^{-1} \mathbf{g}' \quad (8)$$

但是,通常并不具有微波辐射的历史资料,但已知微波吸收系数与气象要素的关系,利用辐射传输方程,可以间接求出 $\mathbf{S}_T$, $\mathbf{S}_{Tg}$ 。这样,按照(8)式所得的反演解叫做统计最优解,实际上它也就是温度偏差向量 $\mathbf{T}'$ 的线性最小方差估计

$$\hat{\mathbf{T}}' = \mathbf{S}_T \mathbf{A}^* (\mathbf{A} \mathbf{S}_T \mathbf{A}^* + \mathbf{S}_{g'})^{-1} \mathbf{g}' \quad (9)$$

式中*号表示矩阵的转置, $\mathbf{S}_T$, $\mathbf{S}_{g'}$ 分别为温度场的验先协方差矩阵以及 $\mathbf{g}$ 向量的误差方差矩阵,后者与辐射观测误差方差矩阵 $\mathbf{R}$ 的关系为

$$\mathbf{S}_{g'} = \mathbf{A}_1 \mathbf{R} \mathbf{A}_1^* \quad (10)$$

其中 $\mathbf{A}_1$ 为最优化组合系数矩阵,可以证明,用(9)式反演方程(7)得到的温度估计 $\hat{\mathbf{T}}'$ 的

误差方差矩阵为

$$S_T = (S_T^{-1} + A^* S_\epsilon A)^{-1} \quad (11)$$

S_T 的对角元素代表相应高度上温度估计值的方差。(11) 式表明, 统计最优反演解的精度与通道选择(通过系数矩阵 A)、测得误差以及温度场的验先统计特征有关。

三、数值试验结果

我们选取氧气 5 毫米吸收带的上述五个频率, 因为这些频率处于吸收线的谷区, 吸收系数对频率的变化不敏感, 通道频带宽度对核函数的影响不大, 故暂且不予考虑。假定地表反射率与频率无关, 对于三种地表反射率计算了相应的最优化核函数, 见图 2、3、4。由北京气象台 1969—1972 年 9、10 月份温度探空资料中挑选 79 次代表晴空(其条件是云量 ≤ 3) 的温度分布, 算得温度场的协方差矩阵。

数值试验中, 根据晴空大气微波辐射传输方程(1)算出亮度温度 $T_{b\gamma}$, 作为观测量的模拟。由于实际探空的高度有限, 大多数只能达到 20 公里左右, 我们一律选到 20 公里, 20 公里以上的温度分布是从标准大气外推得到的, 这样所得到的原始温度分布也带有模拟性。此外, 假定各通道的观测误差相互独立, 且具有相同的标准偏差 ϵ , 根据(10)式, ϵ 的误差方差矩阵为

$$S_\epsilon = \epsilon^2 A A^* \quad (10')$$

我们取 $\epsilon = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0K$ 等不同情况, 按照(9)式对 50 组模拟的微波辐射资料进行了反演, 表 3 给出一个典型的例子。从这个例子中可以看到, 在 ϵ 相同的条件下, 反演的结果与地表反射率的关系不大, 彼此之间的差别在 $\pm 0.2K$ 以内。这一差别是由于各自的系数矩阵 A 的差别造成的。由此可见, 如果用统一的系数矩阵来处理不同地表上空的辐射资料, 其差别也在 $\pm 0.2K$ 以内。此外, 表 3 还表明反演解的精度(以反演值与真值的均方根偏差 σ' 来表示)随着 ϵ 的减小而得到改善。

表 3 $\epsilon = 0.5, 1.0, 2.0K$ 时不同地表条件下的反演结果

高度(公里)			1	5	10	15	20	反演值与真值的 均方根偏差 $\sigma'(K)$
真值(K)			289.7	263.9	228.0	217.0	219.0	
反 演 值 (K)	$\epsilon = 0.5$	$R = 0$	288.01	262.66	227.85	216.26	220.54	4.31
		$R = 0.2$	288.08	262.69	227.84	216.25	220.54	1.31
		$R = 0.5$	288.18	262.73	227.83	216.25	220.55	1.28
	$\epsilon = 1.0$	$R = 0$	287.41	261.95	228.09	216.94	219.92	1.50
		$R = 0.2$	287.54	262.02	228.08	216.93	219.93	1.44
		$R = 0.5$	287.71	262.11	228.06	216.91	219.93	1.36
	$\epsilon = 2.0$	$R = 0$	286.34	261.18	228.43	217.21	219.10	2.04
		$R = 0.2$	286.47	261.28	228.45	217.18	219.10	1.96
		$R = 0.5$	286.67	261.67	228.49	217.14	219.09	1.86

在[1]中, 我们讨论了核函数最优化方法的物理意义, 曾指出最优核满足归一化条件, 即

$$\int_0^{\infty} \sum_j \rho_j(z_0) W_j(z) dz = 1 \quad (11)$$

因而可以认为方程 (5) 所表示的 g'_i 是高度 z_{0i} 上的温度偏差的加权平均值, 记为 $\bar{T}'(z_0)$, 也可以把它看成是温度的平均反演解, 即

$$\bar{T}'(z_0) = \sum_j a_j(z_0) (\tilde{T}_{b_j} - \tilde{T}_{b_{01}}) \quad (12)$$

此时 (10) 式就是平均反演解的误差方差矩阵。在观测误差矩阵作了上述假定的条件下, 式 (10') 中 S_e 的对角元就是各个最优高度上的平均反演解的均方差, 也即某一最优反演高度上的最优化系数的平方和 $\sum_j a_j^2(z_0)$, 就是 z_0 高度上平均反演的误差放大因子。表 4 列出几种地表反射率下的误差放大因子。可见, 用最优核作平均反演其误差的放大是相当惊人的, 而且放大因子与地表反射率关系很大。

表 4 平均反演的误差放大因子

$R \backslash z_0$ (公里)	1	5	10	15	20
0	75.7	38.2	12.9	3.0	0.7
0.2	63.1	39.2	13.0	3.0	0.7
0.5	46.8	41.3	13.4	3.0	0.7

一些作者^{[4], [5]}讨论了偏离度与误差放大因子之间的最佳匹配问题, 发现 $t_r(S_e)/\epsilon^2$ 与 $(\Delta z)^2$ 是互相制约的两个因素。我们这里的做法是将最优核作为改善数值反演解的稳定

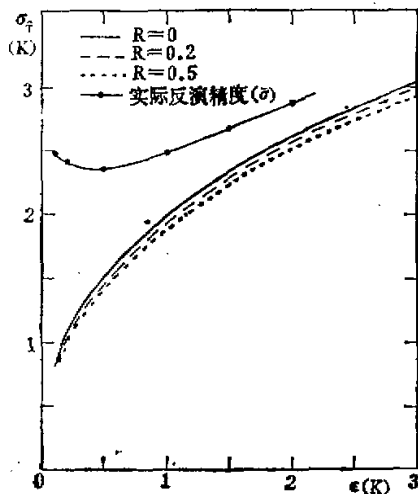


图 5 反演误差 σ_T 、 $\bar{\sigma}$ 与观测误差 ϵ 的关系

性的一种手段。一旦求出具有极限空间分辨率的最优核(此时对应的误差放大因子最大)以后, 再用统计最优法抑制误差的传递, 最终衡量反演误差大小的不是 S_e , 而是 S_f 。

如上所述, (11) 式所表示的温度反演解的均方根误差为, $\sigma_T = \sqrt{t_r(S_f)/5}$, 符号 t_r 表示对矩阵 S_f 的对角元素求和。 σ_T 代表了反演精度的理论值, 它只与通道选择、观测误差和温度场的验先方差有关, 而与具体的廓线反演无关。图 5 是 σ_T 与 ϵ 的关系, 它表明理论上的反演精度对观测误差是相当敏感的, 但与地表反射率关系不大。

然而在实际中, 每一廓线的反演值与真值的均方根偏差 σ' 并不会恰好等于 σ_T , 但是大量廓线反演值的 σ' 的统计平均 $\bar{\sigma}$ 应接近 σ_T 。图 5 还给出了实际反演精度 $\bar{\sigma}$ 与 ϵ 的关系, 它是 50 次反演结果的平均。由图可见, $\bar{\sigma}$ 大于相应的 σ_T 。这是因为 σ_T 代表的是离散系统 (7) 的误差统计特征, 而 $\bar{\sigma}$ 是连续线性系统 (5) 离散化以后的特征。反演值 $\hat{T}$ 是一定空间范围内的平均结果, 而“真值”是某一高度上的温度, 两者在取样的代表性上是有差别的。

此外,图上还表明一个重要的现象,即 $\bar{\sigma}$ 和 ε 的关系并非单调递增,当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时, $\bar{\sigma}$ 反而增大. 这个结果说明,对于统计最优反演方法来说,实际的反演效果并非是观测误差越小反演精度越高. 这是由于观测误差在实际的数值反演过程对解的不稳定性起着光滑因子的作用,太小的 ε 反而不足以抑制解的不稳定性. 这一特点也可以从(9)式看出: 倘若 $\varepsilon \rightarrow 0$, (9) 式将退化为对方程(7)直接求“精确解”,而由于第一类 Fredholm 积分方程数值解的不稳定性,这种“精确解”对误差是十分敏感的,这样得到的反演值往往与真值出现较大的偏离. 对于目前所讨论的具体情况来说, ε 一般取 0.5K 为最好. 显然,这一最佳的 ε^* 值与所选取的通道以及温度场的验先方差等因素有关.

应该说明的是,在应用统计最优反演时以及在误差讨论中假定了各通道的观测误差相同,彼此统计上无关. 这样,观测误差的协方差矩阵便简化为对角矩阵. 这就使得求解变得比较简单,问题的讨论也比较明确. 这当然是对实际情况的一种理想的近似,但是在微波段,这一近似通常是能够满足的.

四、结 论

从以上的数值试验中,我们可以得到以下两点结论:

1. 不同类型的地表对于空对地微波测温遥感方程核函数的影响仅限于吸收不太强的通道上. 利用核函数最优化技术求得的最优核基本上与地表反射率无关. 用这样一组统一的最优核来处理不同地表上空的辐射资料,所产生的误差一般在 0.2K 以内.
2. 对于统计最优反演方法而言,在通道和温度场的统计样本选定以后,存在着一个最佳的观测误差 ε^* ,它所对应的实际反演的精度最高.

参 考 文 献

- [1] 周秀骥等,大气遥感探测问题的研究(一),“中国科学院大气物理研究所集刊”,第5号,1977.
- [2] 曾庆存,大气红外遥感原理,科学出版社,1974.
- [3] Westwater E. R., *Monthly Weather Review*, **100** 15—28, 1972.
- [4] Conrath B. J., *J. Atmosph. Sci.*, **29** 1262—1271, 1972.
- [5] Backus G. & F. Gilbert, *Geophys. J. R. Astro. Soc.*, **16** 169, 1968.

NUMERICAL SIMULATION FOR MICROWAVE REMOTE SENSING OF THE ATMOSPHERIC TEMPERATURE PROFILES FROM SPACE

Huang Run-heng

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

The effect of earth's surface on the kernel functions for microwave remote sensing of the atmospheric temperature profiles is investigated. By means of the optimization technique a set of optimal kernels almost independent of the earth's property is obtained. Using the statistically optimal inversion method 50 sets of simulation microwave radiation data are retrieved. The influence of observational error on the inversion accuracy is discussed.