

气象卫星的红外遥测及反演

(一)

中国科学院大气物理研究所 编著

科学出版社

气象卫星的红外遥测及反演

(一)

中国科学院大气物理研究所 编著

科学出版社

1977

内 容 简 介

本论文集讨论气象卫星利用红外方法遥测大气温度垂直分布的理论以及有关设计要求的一些问题。共有七篇文章,分别讨论遥测气温应选取的红外频段通道的数目、通道选择的方法以及求解气温垂直分布的方法等,还讨论了与遥测问题有关的大气分子光谱及红外透过率的计算问题,并给出实验测量 CO_2 15 微米吸收带透过率的一些初步结果。可供设计工作参考,也可供卫星气象、大气遥测的研究和实际工作以及教学工作参考。

气象卫星的红外遥测及反演

(一)

中国科学院大气物理研究所 编著

*

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1977 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1977 年 4 月第一次印刷 印张: 4 5/8

印数: 0001—2,670 字数: 101,000

统一书号: 13031·568

本社书号: 832·13—15

定价: 0.70 元

限国内发行

前 言

气象卫星是强有力的气象观测工具,它能够观测全球范围的天气现象和大气状态,既可以用摄影或光学扫描方法获得各地区云层分布等云图资料,还可以用光谱仪和辐射计等获得全球各处的气温和湿度等气象要素这样一些定量的资料。随着技术的进一步发展,还可望提供有关风场、雨区和云内状况等资料。观测区域是全球,高度由地表至平流层甚至更高,因此它在监视和预告天气变化以及在大气物理科学研究中有很重要的意义。在战时还可以通过自己的卫星及时地获得敌区和任何需要侦察的地段的气象情报;侦察卫星的发射以及空间技术等试验也需事先有目标地区的气象情报,因此往往利用气象卫星先作气象侦察。由此可见,气象卫星在国防和军事上也有重要意义。气象卫星在气象业务中是这样的重要,世界各国都十分重视发展气象卫星。美国还在五十年代人造地球卫星未上天之前即已规划和设计了利用卫星来获得全球气象情报。现在美苏两个超级大国每天都有两个以上的气象卫星在作日常的业务气象观测。法国、欧洲联合组织以及日本也在大力发展自己的气象卫星,计划在七十年代中期用于气象业务。还应指出的是,美国自从六十年代初气象卫星发射成功,拥有一国可以获得全球气象情报的工具之后,美苏立即合伙向联合国和世界气象组织(WMO)提出建议,改组原有的世界气象站网,组成“世界天气监视网”(WWW),成立“世界气象中心”和“通讯枢纽”;还组成“大气科学委员会”,进行“全球大气研究计划”(GARP)的规划和组织工作。这两项计划已为世界气象组织所采纳并付之实现。美苏两霸就是“世界气象中心”,所有气象资料,包括常规的和非常规的、业务用的和研究工作用的,都必须集中到“世界气象中心”去,而他们却只向别国提供一部分资料,至于气象卫星所获得的资料更是由他们各自独占,想给就给一点,苏修至今都不肯提供其气象卫星资料。两个超级大国的用心是非常明显的。但是**“矛盾着的对立的双方互相斗争的结果,无不在一定条件下互相转化。”**两个超级大国垄断全球气象资料的企图只能唤起各国人民的觉醒,激发各国的反抗,结果必将是垄断被彻底打破。现在,国家要独立,民族要解放,人民要革命,已成为不可抗拒的历史潮流,反对两个超级大国的霸权主义是全世界人民的共同斗争。因此,世界天气监视网以及全球大气研究计划最终必将朝着有利于各国人民的方向发展。其实,由于气象卫星具有获得全球气象情报的能力,它既然可以作为垄断讹诈的手段,于是它本身也就可以转化成反垄断的工具,拥有空间技术能力的其他各国现都把它作为反霸反垄断的技术手段,努力发展自己的气象卫星;并且由于气象卫星有能够进行全球气象观测的优越性,它正日益成为全球气象观测系统的重要组成部分,而且更加重要,这已是毫无疑问的了。

“我们也要搞人造卫星”,毛主席这一伟大号召已经实现,我国发射的人造卫星在地球上空不停地运转,为我们发回了大量实验的数据。我们深信,要不了多少年,在我们的星球上空,必将有我国自己的气象卫星。到那时,神箭高冲千里外,红星遥测五洲天,它将为我国人民和全世界人民昼夜监视天气变化。让这两个超级大国利用气象卫星搞垄断讹诈见鬼去吧!

为了有效地进行遥测,必须妥善解决需要和可能这对矛盾。就以气温遥测来说,我们既要考虑到它的三度空间的变化特点,以及气象预告或其他方面的需要而提出一定的要求。当然,这些要求的指标必须是合理的和内部协调的。但是在提指标的时候,还需考虑到技术上的可能性,尤其是由于空间技术的自动化要求非常高,所需遥测的东西愈少,存贮和传输的信息量愈小就愈好,因此,如果对仪器技术的要求愈低,所需的信息量愈小就愈容易实现而且愈稳妥可靠,愈能够保证气象业务等的需要。必须妥善研究和解决这对矛盾,提出最优最合理的遥测方案来。

经过伟大的无产阶级文化大革命,我国科研工作毛主席的无产阶级革命路线的指引下蓬勃发展。在大好形势下,我国卫星气象研究工作也有较大的发展。我们为探讨利用卫星遥测大气物理参数问题做了一点工作,主要讨论利用红外方法遥测大气温度与温度垂直分布的理论、有关的红外光谱和透过率计算的理论以及与设计有关的一些问题。我们拟将这些工作分两集发表出来。

本集是第一集,其第一篇文章对一些有代表性的气象站的气温垂直分布进行了统计分析,由此得出为了满足大范围天气预告的要求一般应有6到7个红外频段的通道进行遥测。第二篇文章讨论选通道的方法,并对二氧化碳15微米吸收带的通道进行了计算,针对仪器可能具有的不同通道宽度和精度选出了几套通道。第三至第五篇则是讨论求解气温垂直分布的方法,并由反演误差讨论对辐射测量精度的要求,结果表明,辐射测量误差在0.5尔格/厘米·秒·单位立体角左右,则反演误差为1—3°C。通过大量计算试验也表明这些求解法是可用的。

我们结合着遥测问题对二氧化碳的红外光谱和透过率进行了一点研究。本集第六篇文章计算了CO₂15微米带一些主要谱线强度公式中的系数,以便在温度不均匀大气中的透过率计算可以较好地计入温度影响。第七篇是我们利用简陋的仪器对CO₂15微米带的某些频段透过率作实验测定的一点结果。

最后应该指出,在遥测气温时必须计入大气中水汽的影响,而湿度本身也是个需遥测的项目,可见测温 and 测湿问题必须同时加以考虑。关于用红外法遥测湿度的一些基本问题将在第二集中讨论。

本工作得到中央气象局和有关单位的大力支持和协助,谨致以深切的感谢。

目 录

气温垂直分布的统计特征及红外遥测法所需的通道个数问题	黄荣辉、曾庆存 (1)
CO ₂ 15 微米带红外测温的通道选择	曾庆存、袁重光、黄荣辉 (14)
求解气温遥测方程的迭代法	袁重光、曾庆存 (19)
用经验正交函数展开的方法来反演气温垂直廓线	黄荣辉、袁重光、曾庆存 (26)
充分考虑地面温度对用经验正交展开法反演气温遥测方法的改进 ...	徐飞亚、袁重光 (35)
CO ₂ 谱线强度公式中系数的计算	刘瑞芝 (40)
CO ₂ 15 微米吸收带某些波段透过率的测量	王明星、赵高祥、王庚辰 (59)

气温垂直分布的统计特征及红外遥测法 所需的通道个数问题

黄荣辉 曾庆存

摘 要

本文用经验正交展开的方法分别展开了北京、上海、广州三地区无线电探空温度廓线,指出在中高纬地区用6个参数就可以描述气温垂直分布特征,而在低纬度地区则以用7—8个参数为宜。从而得出用红外技术遥测大气温度的垂直分布,在中高纬地区一般需用6个通道就可满足所需的精度要求,而在低纬度地区则需用7—8个通道才能满足相对精度的要求(但如对温度绝对误差的要求和中高纬地区的要求相同,则6个通道也满足要求)。并指出:如果反演计算的误差和辐射测量误差相一致的话,则当用6个通道时,可允许的仪器误差为不大于1尔格/厘米·秒·单位立体角。

一、引 言

在气象卫星上安装红外光谱仪接收地表和大气所放射的热辐射可以推算出地表面与大气各层的温度值。在作设计的时候首先碰到的一个问题到底是需选取多少个通道才能有效地反映出大气气温垂直分布的特征?若选取通道数目太少,反演出的气温垂直廓线过于粗略,势必与真实气温廓线相比有较大的误差。若通道数目过多,则不仅要求仪器的分辨率很高,使制作仪器增加困难,而且要求有很高的灵敏度,否则这些通道的测量值之间存在一定的相关性,也使得我们反演不出所要测的各层温度值。因此,如何选取一组合适的通道数,在作气象卫星探测规划时,这是一个必须研究的问题。为此,本文用经验正交展开的方法分析已有的无线电探空资料,研究气温垂直分布特征,得出描写气温垂直分布特性所需的参数数目,从而指出卫星遥测所应选取的通道数目。

二、用经验正交函数展开气温垂直廓线

1. 大气温度场垂直分布特征

大气温度场垂直分布虽然随着时间、地点而异,但是从气候统计观点看,总有一定的共同性。无论什么季节及地区,在对流层温度随高度递减,在对流层与平流层之间存在着一个窄狭的过渡带——对流层顶,在对流层顶以上,温度开始是缓慢而后是比较快地随高度增加。在一定的精度范围内,只需用有限个参数就可以反映出整层气温垂直分布的特征。例如在图1中所表示的情况就是理想化了的气温分布,只要用3个参数就可以表示出任何高度上的气温。当然,实际气温垂直分布要比它复杂,但是用正交展开的方法也同

表 1a 北京各层温度

C_T / i (毫巴)		50	100	150	200	250	300	350	400	450
i (毫巴)		1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	1	743.3	401.6	172.2	98.9	-116.3	-282.0	-375.1	-439.4	-485.9
100	2	401.6	834.5	593.8	506.3	28.2	-294.2	-527.5	-670.0	-763.8
150	3	172.2	593.8	765.6	791.7	196.6	-256.9	-513.9	-645.7	-739.6
200	4	98.9	506.3	791.7	1453.3	584.8	-158.9	-567.9	-788.0	-981.6
250	5	-116.3	28.2	196.6	584.8	826.7	353.3	81.8	-66.1	-175.2
300	6	-282.0	-294.2	-256.9	-158.9	353.3	774.9	825.9	802.3	763.7
350	7	-375.1	-527.5	-513.9	-567.9	81.8	825.9	1231.9	1331.7	1371.3
400	8	-439.4	-670.0	-645.7	-788.0	-66.1	802.3	1331.7	1597.6	1706.7
450	9	-485.9	-763.8	-739.6	-981.6	-175.2	763.7	1371.3	1706.7	1917.8
500	10	-576.3	-871.8	-829.9	-1136.8	-228.5	766.4	1422.9	1800.2	2069.2
550	11	-624.6	-943.6	-859.9	-1225.6	-232.9	787.8	1468.9	1880.2	2184.8
600	12	-657.7	-971.0	-875.7	-1288.8	-303.2	759.7	1481.2	1922.3	2246.6
650	13	-668.0	-914.8	-852.6	-1240.8	-257.7	783.9	1480.8	1932.7	2254.3
700	14	-704.5	-854.0	-805.1	-118.2	-168.9	833.5	1481.2	1913.3	2235.7
750	15	-734.2	-854.2	-781.9	-1092.1	-64.1	922.3	1520.8	1926.9	2216.1
800	16	-719.3	-856.1	-737.3	-953.0	17.4	841.9	1423.3	1813.4	2099.9
850	17	-702.4	-851.6	-697.9	-874.8	37.9	795.9	1342.8	1713.4	2012.0
900	18	-662.0	-768.7	-545.3	-642.6	119.6	728.4	1178.5	1475.8	1708.9
950	19	-631.6	-691.3	-428.3	-435.7	203.7	695.5	1079.4	1327.8	1504.5
1000	20	-540.3	-591.2	-316.9	-255.2	242.8	628.0	952.7	1142.1	1275.4

表 1b 北京各层温度离差的相关矩阵

特征向量 (毫巴)		50	100	150	200	250	300	350	400	450
特征值		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	35394.2	-0.068	-0.089	-0.078	-0.103	-0.008	0.084	0.145	0.182	0.209
2	4377.0	-0.017	0.109	0.205	0.345	0.202	-0.031	-0.150	-0.203	-0.234
3	1749.2	-0.173	-0.089	0.042	0.351	0.470	0.474	0.410	0.306	0.186
4	1080.7	0.095	0.485	0.450	0.353	0.102	0.015	-0.049	-0.032	-0.022
5	731.2	0.660	0.419	0.126	-0.133	-0.246	0.073	0.241	0.223	0.173
6	628.4	-0.304	-0.074	0.313	0.314	-0.316	-0.278	-0.081	0.043	0.100
7	411.5	-0.119	0.005	0.166	0.266	-0.242	-0.175	0.038	0.150	0.214
8	358.4	0.588	-0.360	-0.131	0.332	0.374	-0.200	-0.215	-0.089	0.016

离差的相关矩阵 C_T'

500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
-576.3	-624.6	-657.7	-668.0	-704.5	-734.2	-719.3	-702.4	-662.0	-631.6	-540.3
-871.8	-943.6	-971.0	-914.8	-854.0	-854.2	-856.1	-851.6	-768.7	-691.3	-591.2
-829.9	-859.9	-875.7	-852.6	-805.1	-781.9	-737.3	-697.9	-545.3	-428.3	-316.9
-1136.8	-1225.6	-1288.8	-1240.8	-1181.8	-1092.1	-953.0	-874.8	-642.6	-435.7	-255.2
-228.5	-232.9	-303.2	-257.7	-168.9	-64.1	17.4	37.9	119.6	203.7	242.8
766.4	787.8	759.7	783.9	833.5	922.3	841.9	795.9	728.4	695.5	628.0
1422.9	1468.9	1481.2	1480.8	1481.2	1520.8	1423.3	1342.8	1178.5	1079.4	952.7
1800.2	1880.2	1922.3	1932.7	1913.3	1926.9	1813.4	1713.4	1475.8	1327.8	1142.1
2069.2	2184.8	2246.6	2254.3	2235.7	2216.1	2099.9	2012.0	1708.9	1504.5	1275.4
2324.1	2488.4	2569.3	2578.5	2557.3	2528.2	2409.9	2329.1	1985.9	1741.4	1464.9
2488.4	2769.0	2873.3	2885.8	2858.6	2845.1	2719.2	2658.7	2304.5	2028.0	1703.5
2569.3	2873.3	3117.4	3162.5	3134.5	3105.3	2962.4	2899.0	2548.2	2237.3	1887.3
2578.5	2885.8	3162.5	3356.4	3363.0	3295.0	3144.3	3065.5	2723.4	2390.1	2011.9
2557.3	2858.6	3134.5	3363.0	3517.6	3470.0	3307.0	3212.0	2883.6	2537.1	2132.0
2528.2	2845.1	3105.3	3296.0	3470.0	3657.1	3457.8	3358.8	3035.1	2696.6	2292.3
2409.9	2719.2	2962.4	3144.3	3307.0	3457.8	3669.9	3647.3	3308.6	2953.2	2472.7
2329.1	2658.7	2899.0	3065.5	3212.0	3358.8	3647.3	3815.9	3501.4	3143.6	2642.8
1985.9	2304.5	2548.2	2723.4	2883.6	3035.1	3308.6	3501.4	3452.2	3196.3	2743.4
1741.4	2028.0	2237.3	2390.1	2537.1	2696.6	2953.2	3143.6	3196.3	3155.1	2782.7
1464.9	1703.5	1887.3	2011.9	2132.0	2292.3	2472.7	2642.8	2743.4	2782.7	2650.8

前 8 个特征值所对应的特征向量

500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.237	0.264	0.284	0.296	0.303	0.310	0.309	0.309	0.282	0.256	0.219
-0.240	-0.212	-0.185	-0.137	-0.073	-0.001	0.140	0.232	0.346	0.400	0.390
0.096	0.022	-0.088	-0.123	-0.118	-0.055	-0.098	-0.138	-0.103	-0.001	0.081
-0.025	0.007	0.075	0.218	0.315	0.301	0.118	-0.018	-0.146	-0.251	-0.265
0.064	0.009	-0.039	-0.080	-0.130	-0.138	-0.112	-0.048	0.044	0.161	0.247
0.150	0.185	0.231	0.153	-0.003	-0.166	-0.334	-0.297	-0.096	0.148	0.343
0.193	0.113	-0.038	-0.226	-0.330	-0.292	0.293	0.445	0.126	-0.108	-0.347
0.094	0.219	0.201	0.159	-0.032	0.050	-0.038	-0.074	-0.015	0.155	-0.271

表 2a 上海各层温度

C_T' (毫巴)		f (毫巴)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	1		707.1	278.0	98.7	-121.0	-244.4	-450.4	-471.2	-436.3	-406.5
100	2		278.0	1449.2	855.7	364.8	-550.2	-1346.2	-1461.1	-1379.4	-1251.2
150	3		98.7	855.7	1045.6	555.2	-232.3	-582.5	-1167.0	-1134.9	-936.5
200	4		-121.0	364.8	555.2	728.1	295.9	224.1	-463.3	-517.5	-484.0
250	5		-244.4	-550.2	-232.3	295.9	1049.3	1565.9	640.4	400.8	338.4
300	6		-450.4	-1346.2	-582.5	224.1	1565.9	7050.8	1391.1	829.0	738.9
350	7		-471.2	-1461.1	-1167.0	-463.3	640.4	1391.1	2094.6	1935.4	1647.0
400	8		-436.3	-1379.4	-1134.9	-517.5	400.8	829.0	1935.4	2054.3	1822.0
450	9		-406.5	-1251.2	-936.5	-484.0	338.4	738.9	1647.0	1822.0	1888.2
500	10		-364.6	-1139.1	-747.7	-461.2	315.5	676.0	1395.5	1591.9	1839.6
550	11		-361.9	-1004.8	-716.8	-412.0	227.6	608.2	1275.0	1459.0	1625.7
600	12		-300.5	-970.1	-659.3	-323.8	228.0	634.3	1126.3	1277.0	1362.5
650	13		-294.3	-928.5	-640.6	-273.1	230.9	734.3	1192.5	1274.9	1283.5
700	14		-306.1	-887.8	-644.2	-273.2	221.8	838.8	1189.9	1284.0	1291.9
750	15		-316.6	-866.0	-689.8	-350.7	179.5	792.8	1208.0	1278.9	1295.6
800	16		-342.4	-872.6	-629.5	-350.0	154.8	718.9	1178.7	1265.4	1324.7
850	17		-362.1	-837.6	-637.4	-393.3	73.9	577.0	1170.4	1298.4	1344.1
900	18		-384.1	-953.1	-754.8	-438.8	183.7	666.8	1296.3	1379.1	1399.8
950	19		-414.9	-920.2	-684.7	-394.5	226.0	830.4	1238.3	1271.2	1312.2
1000	20		-419.0	-883.4	-633.9	-360.5	242.6	854.1	1174.8	1212.2	1244.1

表 2b 上海各层温度离差的相关矩阵

特征 向量 (毫巴)		50	100	150	200	250	300	350	400	450
特征 值		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	26585.7	-0.056	-0.157	-0.117	-0.058	0.046	0.160	0.206	0.216	0.215
2	5805.8	-0.064	-0.289	-0.215	-0.060	0.186	0.321	0.356	0.326	0.276
3	2204.3	-0.126	-0.113	-0.010	0.228	0.474	0.511	0.152	-0.087	-0.236
4	1361.9	-0.213	0.088	0.413	0.515	0.344	0.043	-0.199	-0.159	0.032
5	1004.5	-0.287	0.081	0.224	0.058	0.030	-0.062	-0.105	-0.036	0.199
6	655.9	0.584	-0.207	-0.060	-0.162	0.188	0.113	-0.275	-0.287	-0.086
7	570.8	0.407	-0.030	0.026	-0.060	0.297	0.102	-0.078	-0.149	0.068
8	330.5	0.516	0.340	0.142	0.360	0.063	-0.121	0.183	0.381	0.231

离差的相关矩阵 C_T

500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
-364.6	-361.9	-300.5	-294.3	-306.1	-316.6	-342.4	-362.1	-384.1	-414.9	-419.0
-1139.1	-1004.8	-970.1	-928.5	-887.8	-866.0	-872.6	-837.6	-953.1	-920.2	-883.4
-747.7	-716.8	-659.3	-640.6	-644.2	-689.8	-629.5	-637.4	-754.8	-684.7	-633.9
-461.2	-412.0	-323.8	-273.1	273.2	-350.7	-350.0	-393.3	-438.8	-394.5	-360.5
315.5	227.6	228.0	230.9	221.8	179.5	154.8	73.9	183.7	226.0	242.6
676.0	608.2	634.3	734.3	838.8	792.8	718.9	577.0	666.8	830.4	854.1
1395.5	1275.0	1126.3	1192.5	1189.9	1208.0	1178.7	1170.4	1296.3	1238.3	1174.8
1591.9	1459.0	1277.0	1274.9	1284.0	1278.9	1265.4	1298.4	1379.1	1271.2	1212.2
1839.6	1625.7	1362.5	1283.5	1291.9	1295.6	1324.7	1344.1	1399.8	1312.2	1244.1
1992.5	1710.3	1371.8	1221.0	1227.9	1248.6	1318.2	1336.4	1371.2	1276.2	1202.6
1710.3	1743.5	1458.8	1306.8	1298.7	1337.4	1432.7	1470.3	1502.2	1367.7	1266.5
1371.8	1458.8	1690.9	1522.7	1545.0	1544.3	1648.3	1716.8	1796.2	1635.2	1486.6
1221.0	1306.8	1522.7	1939.8	1687.1	1698.0	1821.3	1925.3	1986.9	1793.9	1604.1
1227.9	1298.7	1545.0	1687.1	1907.3	1907.4	2044.4	2149.7	2148.7	1931.9	1741.0
1248.6	1337.4	1544.3	1698.0	1907.4	2118.3	2311.7	2428.9	2426.7	2151.9	1905.8
1318.2	1432.7	1648.3	1821.3	2044.4	2311.7	2765.4	2945.9	2906.3	2547.2	2207.6
1336.4	1470.3	1716.8	1925.3	2149.7	2428.9	2945.9	3440.7	3375.1	2963.4	2540.9
1371.2	1502.2	1796.2	1986.9	2148.7	2426.7	2906.3	3375.1	3659.4	3277.8	2822.6
1276.2	1367.7	1635.2	1793.9	1931.9	2151.9	2547.2	2963.8	3277.8	3145.1	2774.1
1202.6	1266.5	1486.6	1604.1	1741.0	1905.8	2207.6	2540.9	2822.6	2774.1	2537.8

前 8 个特征值所对应的特征向量

500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.207	0.209	0.221	0.238	0.246	0.263	0.294	0.319	0.335	0.307	0.275
0.237	0.159	0.039	-0.015	-0.061	-0.114	-0.213	-0.304	-0.292	-0.245	-0.181
-0.330	-0.310	-0.183	-0.123	-0.062	-0.040	-0.017	0.009	0.131	0.197	0.177
0.172	0.197	0.236	0.262	0.195	0.094	0.081	-0.046	-0.165	-0.176	-0.138
0.378	0.225	-0.091	-0.320	-0.338	-0.311	-0.216	-0.057	0.140	0.321	0.337
0.078	0.103	0.331	0.207	-0.008	-0.128	-0.221	-0.263	0.035	0.178	0.188
0.312	0.114	-0.237	-0.402	-0.150	0.077	0.333	0.334	0.078	-0.176	-0.286
0.046	-0.185	-0.286	0.183	0.089	-0.082	-0.175	-0.023	0.065	0.094	0.085

表 3a 广州各层温度

C_T (毫巴)		50	100	150	200	250	300	350	400	450
i (毫巴)		1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	1	1059.6	-72.2	27.5	108.7	74.4	70.9	-104.2	-78.1	-65.4
100	2	-72.2	610.4	114.3	-95.4	792.7	-277.8	-368.1	-425.8	-332.9
150	3	27.5	114.3	293.6	129.7	70.3	12.4	-89.1	-138.2	-123.9
200	4	108.7	-95.4	129.7	274.4	252.1	222.6	142.9	79.0	57.5
250	5	74.4	-192.7	70.3	252.1	354.1	338.2	252.6	210.1	152.7
300	6	70.9	-277.8	12.4	222.6	338.2	423.9	375.2	336.2	259.7
350	7	-104.2	-368.1	-89.1	142.9	252.6	375.2	589.5	596.7	487.0
400	8	-78.1	-425.8	-138.2	79.0	210.1	336.2	596.7	862.1	727.1
450	9	-65.4	-332.9	-123.9	57.5	152.7	259.7	487.0	727.1	777.8
500	10	-45.4	-204.8	-88.1	-3.7	70.9	137.5	309.7	502.3	608.9
550	11	-57.0	-190.5	-76.5	-16.5	47.1	91.4	224.9	368.8	431.9
600	12	-171.6	-214.9	-56.6	-24.2	50.8	96.6	212.4	308.8	317.2
650	13	-223.7	-198.2	-27.1	-30.8	44.2	76.2	180.0	260.3	294.9
700	14	-24.1	-134.2	23.6	12.6	71.8	90.9	110.8	178.8	217.1
750	15	248.9	-167.3	35.2	125.0	129.5	142.3	105.1	173.4	218.4
800	16	261.3	-79.0	83.4	116.4	103.1	92.4	30.3	62.1	100.3
850	17	223.0	-191.2	66.1	104.5	92.0	92.8	73.9	80.1	101.8
900	18	264.8	-273.4	153.9	227.0	235.5	235.9	222.2	266.8	226.6
950	19	182.0	-321.6	171.6	258.7	263.7	273.3	312.9	409.7	351.9
1000	20	180.6	-345.2	136.9	255.8	270.9	287.2	336.7	455.0	381.1

表 3b 广州各层温度离差的相关矩阵

特征 向量 (毫巴)		50	100	150	200	250	300	350	400	450
特征 值		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	7713.7	0.044	-0.129	0.019	0.065	0.085	0.101	0.129	0.172	0.164
2	2573.7	-0.271	-0.188	-0.156	-0.051	0.044	0.125	0.304	0.410	0.401
3	1632.0	-0.386	0.233	-0.019	-0.239	-0.273	-0.315	-0.271	-0.254	-0.147
4	1048.0	0.693	-0.021	-0.126	-0.103	-0.108	-0.088	-0.148	-0.030	0.120
5	634.5	-0.106	-0.220	0.123	0.260	0.383	0.368	0.108	-0.191	-0.235
6	482.4	-0.218	0.601	0.396	0.258	0.177	0.068	-0.049	-0.024	0.221
7	430.6	-0.373	-0.192	-0.181	-0.165	-0.185	-0.121	0.079	0.102	0.113
8	289.7	0.093	0.181	-0.063	-0.136	-0.097	-0.032	0.028	0.227	0.140

离差的相关矩阵 C_T

500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
-45.4	-57.0	-171.6	-223.7	-24.1	248.9	261.3	223.0	264.8	182.0	180.6
-204.8	-190.5	-214.9	-198.2	-134.3	-167.3	-79.0	-191.2	-273.4	-321.6	-345.4
-88.1	-76.5	-56.6	-27.1	23.6	35.2	83.4	66.1	153.9	171.6	136.9
-3.7	-16.5	-24.2	-30.8	12.6	125.0	116.4	104.5	227.0	258.7	255.8
70.9	47.1	50.8	44.2	71.8	129.5	103.1	92.0	235.5	263.8	270.9
137.5	91.4	96.6	76.2	90.9	142.3	92.4	92.8	235.9	273.3	287.2
309.7	224.9	212.4	180.0	110.8	105.1	30.3	73.9	222.2	312.9	336.7
502.3	368.4	308.8	260.3	178.8	173.4	62.1	80.1	266.8	409.7	455.0
608.9	431.9	317.2	294.9	217.1	218.4	100.3	101.8	226.6	351.9	381.1
707.7	548.7	408.0	402.7	308.4	265.9	149.3	180.8	275.6	367.4	377.7
548.7	642.6	562.6	537.7	393.9	312.6	214.9	289.3	420.7	513.0	513.6
408.0	562.6	734.9	669.9	452.2	280.3	166.4	259.3	411.1	558.0	605.3
402.7	537.7	669.9	857.0	618.0	340.7	186.9	356.2	515.2	613.2	609.4
308.4	393.9	452.2	618.0	737.2	436.3	269.2	442.5	626.3	664.2	656.0
265.9	312.6	280.3	340.7	436.3	578.6	382.6	423.3	593.2	628.5	597.1
149.3	214.9	166.4	186.9	269.2	382.6	450.6	463.4	577.0	581.3	518.8
180.8	289.3	259.3	356.2	442.5	423.3	463.4	732.7	906.6	865.5	768.4
275.6	420.7	411.1	515.2	626.3	593.2	577.0	906.6	1453.1	1520.8	1415.6
367.4	513.0	558.0	613.2	664.2	628.5	581.3	865.5	1520.8	1814.1	1777.7
377.7	513.6	605.3	609.4	656.0	597.1	518.8	768.4	1415.6	1777.7	1861.7

前 8 个特征值所对应的特征向量

500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.169	0.198	0.204	0.222	0.222	0.200	0.164	0.239	0.389	0.451	0.447
0.317	0.213	0.191	0.156	0.008	-0.060	-0.151	-0.200	-0.268	-0.222	0.178
0.072	0.216	0.316	0.409	0.279	0.010	-0.030	0.041	-0.042	-0.041	-0.053
0.259	0.216	0.037	0.038	0.129	0.295	0.223	0.148	-0.066	-0.245	-0.284
-0.227	-0.081	0.109	0.299	0.319	0.211	0.089	0.119	-0.012	-0.231	-0.302
0.334	0.091	-0.200	-0.148	0.031	0.178	0.221	-0.035	0.012	-0.010	-0.124
0.007	-0.118	-0.376	-0.149	0.061	0.044	0.200	0.506	0.304	-0.054	-0.333
-0.144	-0.391	-0.315	0.076	0.631	0.215	-0.229	-0.233	-0.074	0.004	0.137

样可用有限个参数表达其垂直分布特征。

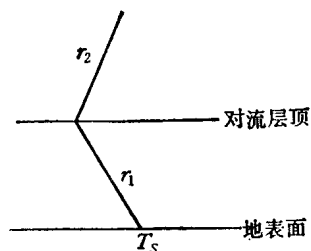


图1 简单的温度廓线

2. 经验正交展开

设 $T(z, t)$ 为气温分布的样品, 其中 z 为高度, t 为时间, 又记 $\bar{T}(z)$ 为平均气温分布, $T'(z, t)$ 为偏差. 即:

$$T(z, t) = \bar{T}(z) + T'(z, t) \quad (2.1)$$

把整个大气分为 N 层, 取 M 个样品, 并简记 $T(z_j, t_m)$ 为

T_{jm} , 即:

$$T_{jm} = \bar{T}_j + T'_{jm} \quad (j = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, M)$$

将每个样品 T'_{jm} 按某种正交函数组展开, 取 $\tilde{N} < N$ 项:

$$T'_{jm} = \sum_{i=1}^{\tilde{N}} (f_i)_m x_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, \tilde{N}; j = 1, 2, \dots, N) \quad (2.2)$$

上式中 $(f_i)_m$ 为展开系数, x_{ij} 为第 i 个标准化正交函数在点 z_j 上的值, 展开系数 $(f_i)_m$ 就是:

$$(f_i)_m = \sum_{j=1}^N (T'_{jm}) x_{ji} \quad (2.3)$$

x_{ji} 为特征向量所组成矩阵的转置. 要求展开后所得的气温与原来气温分布的差值(展开误差), 对所有样品平均来说为最小, 从理论上可证明, 这样的正交函数组就是气温的协方差矩阵的特征向量^[1]. 由此可见, 这种函数(特征向量)完全由样品全体的特点所决定, 因此, 这种展开法即称经验正交函数展开的方法, 这种函数(向量)称经验正交函数(向量).

气温的协方差矩阵 C_T

$$C_T = \begin{pmatrix} \sum_{m=1}^M (T'_1 T'_1)_m, & \sum_{m=1}^M (T'_1 T'_2)_m, & \dots, & \sum_{m=1}^M (T'_1 T'_N)_m \\ \sum_{m=1}^M (T'_2 T'_1)_m, & \sum_{m=1}^M (T'_2 T'_2)_m, & \dots, & \sum_{m=1}^M (T'_2 T'_N)_m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{m=1}^M (T'_N T'_1)_m, & \sum_{m=1}^M (T'_N T'_2)_m, & \dots, & \sum_{m=1}^M (T'_N T'_N)_m \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

其所有特征值 $\lambda_i \geq 0$, 若按其大小顺序排列, 即 $\lambda_i \geq \lambda_{i+1}$, 则按照积分方程理论, 按经验正交函数展开, 而只取前 $\tilde{N}$ 项的均方根误差

$$\sigma_N^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i - \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \lambda_i = \sum_{i=\tilde{N}+1}^N \lambda_i \quad (2.5)$$

由 (2.5) 式还可得到:

$$\epsilon_N = 1 - \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \lambda_i / \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad (2.6)$$

ϵ_N 称相对方差. 很明显, $\tilde{N}$ 愈大, 则相对方差愈小. 由于气温垂直分布的内在相关性, 故在一定允许的精度范围内, $\tilde{N}$ 不用取得相当大, 而展开的相对方差仍可达到允许的范围之内.

既然协方差矩阵是实对称的, 所以我们用 Jacobi 方法或用收缩迭代方法求出所有特

征值及特征向量。

3. 结 果

我们用经验正交展开的方法分别展开了北京、上海、广州三个地区的温度垂直廓线, 每个地区分别取 90 天探空温度廓线 (从 1970 年 11 月 1 日到 1971 年 1 月 31 日) 作为样品。每根探空温度廓线分成 20 层 (50 毫巴一层), 这样分别得到 20 阶的协方差矩阵。表 1a, 表 2a 及表 3a 分别为北京、上海及广州三地区的气温的协方差矩阵。表 1b, 表 2b 及表 3b 分别为这三地区的前 8 个特征值及其所对应的特征向量。

我们分别挑选了矩阵前 4, 6 或 8 个特征值所对应的前几组特征向量展开, 这样分别得到用这三种不同参数数目展开的气温垂直分布廓线。

设 σ_T 为按经验正交展开所得各层近似气温值与探空廓线各层气温值的均方根误差;

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{90} \sum_{j=1}^{20} [T_{jm} - (T_{jm})_0]^2}{90 \times 20}} \quad (2.7)$$

σ_{T_0} 为原气温垂直廓线的离散度:

$$\sigma_{T_0} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{90} \sum_{j=1}^{20} [(T_{jm})_0 - (\bar{T}_j)_0]^2}{90 \times 20}} \quad (2.8)$$

上两式中 T_{jm} 为每天用经验正交展开得到的各层气温近似值, $(T_{jm})_0$ 为原每天各层气温值。则对于上述三地区所得结果如下:

(1) 用协方差矩阵前 4 个特征值所对应的前 4 组特征向量展开 (4 个参数展开), 其结果见表 4:

表 4

地 区	$\sum_{i=1}^4 \lambda_i / \sum_{i=1}^{20} \lambda_i (\%)$	$\sigma_T (^\circ\text{C})$	$\sigma_{T_0} (^\circ\text{C})$	$\sigma_T / \sigma_{T_0} (\%)$
北 京	93.3	1.7	5.0	34
上 海	90.5	2.2	4.6	48
广 州	82.6	1.6	3.0	54

(2) 用协方差矩阵前 6 个特征值所对应的前 6 组特征向量展开 (6 个参数展开), 其结果见表 5:

表 5

地 区	$\sum_{i=1}^6 \lambda_i / \sum_{i=1}^{20} \lambda_i (\%)$	$\sigma_T (^\circ\text{C})$	$\sigma_{T_0} (^\circ\text{C})$	$\sigma_T / \sigma_{T_0} (\%)$
北 京	96.3	1.0	5.0	19
上 海	94.2	1.1	4.6	24
广 州	89.1	1.0	3.0	33

(3) 用协方差矩阵前 8 个特征值所对应的前 8 组特征向量展开 (8 个参数展开), 其结果见表 6:

表 6

地 区	$\sum_{i=1}^8 \lambda_i / \sum_{i=1}^{20} \lambda_i (\%)$	$\sigma_T (^\circ\text{C})$	$\sigma_{T_0} (^\circ\text{C})$	$\sigma_T / \sigma_{T_0} (\%)$
北 京	98.0	0.5	5.0	10
上 海	96.5	0.8	4.6	17
广 州	93.6	0.6	3.0	20

从表 4 可看出: 用 4 个参数来展开气温垂直廓线显得粗糙些, 不能很好地反映其垂直分布特征, 展开后得到的各层气温值与原各层气温值的均方根误差均超过 1.5°C , 有的甚至超过 2°C , 与其原气温离散度比较, 则相对比值均超过 30%, 有的甚至超过 50%, 这是不满足气象上的要求的。从表 5 可很清楚看出用 6 个参数来展开气温垂直廓线一般是可以的, 展开后所得各层气温值与原各层气温值的均方根误差均在 1°C 左右, 一般说来, 这是我们气象上所允许的, 在探空仪精度范围之内。但是从表中也看出, 对于纬度较低的广州, 用 6 个参数来描述气温垂直分布, 虽然绝对误差在 1°C 左右, 但相对离差仍达到 33%, 这仍然是不能令人满意的。从表 6 我们可发现, 用 8 个参数来描述, 对于低纬的广州显然结果好了很多, 其均方根误差只有 0.6°C , 与原气温离散度比较, 其相对量已减少至 20% 了。

综上所述, 一般对于中高纬地带气温垂直分布可以用 6 个参数来描述, 而对于低纬度、热带、亚热带地区则用 7—8 个参数来描述比较合适。

图 2, 3, 4 分别为北京、上海、广州三地区用 6 个参数作经验正交展开所得到某一天的近似气温廓线, 有的几乎重合。当然, 我们所用的方法毕竟是统计方法, 因此也有逼近较差的情况, 图 5, 6 及 7 就是这种情况, 与原气温廓线误差较大, 特别对于锋面逆温层这

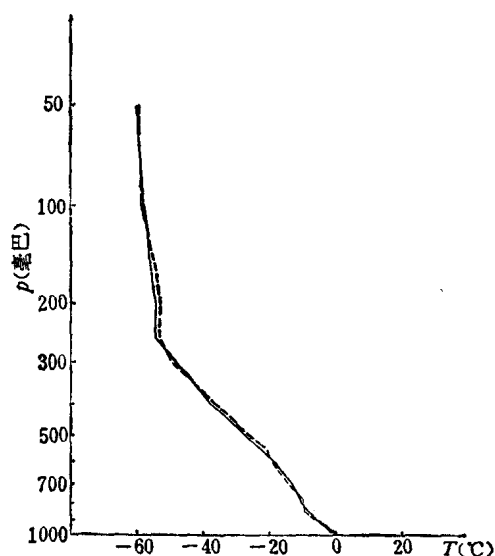


图 2 北京 1970 年 11 月 22 日 12 时 00 分 (世界时) 探空温度廓线与用经验正交展开得到的温度廓线比较

——无线电探空温度廓线;
——用经验正交展开得到的温度廓线

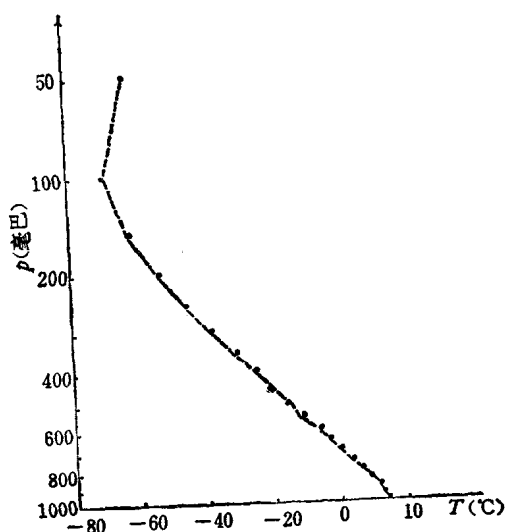


图 3 上海 1970 年 11 月 7 日 12 时 00 分 (世界时) 探空温度廓线与用经验正交展开得到的温度廓线比较

——无线电探空温度廓线;
• 用经验正交展开得到的各层温度值

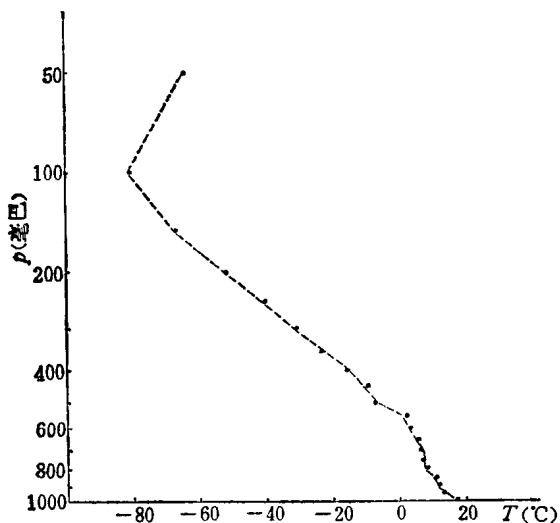


图4 广州1970年12月11日12时00分(世界时)探空温度廓线与用经验正交展开得到的温度廓线比较

——无线电探空温度廓线;
• 用经验正交展开得到的各层温度值

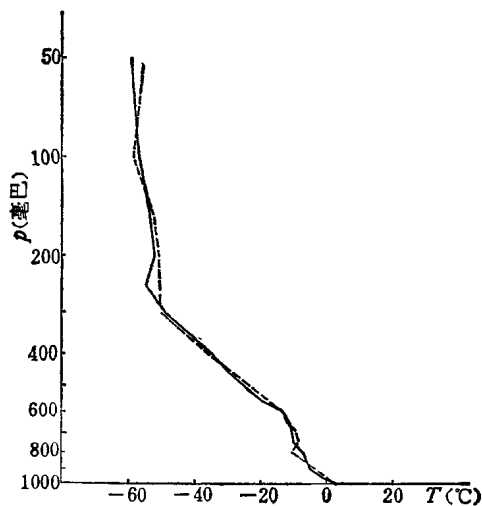


图5 北京1970年12月2日12时00分(世界时)探空温度廓线与用经验正交展开得到的温度廓线比较

——无线电探空温度廓线;
——用经验正交展开得到的温度廓线

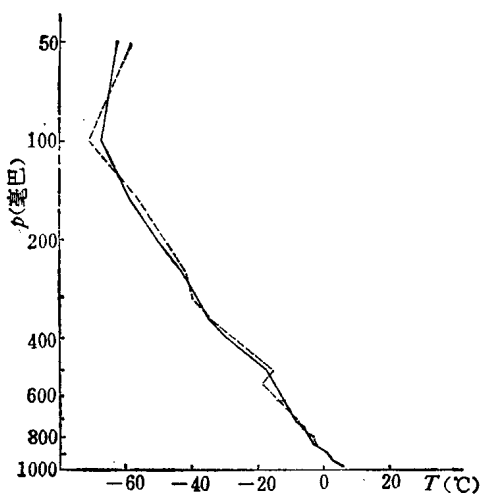


图6 上海1970年12月30日12时00分(世界时)无线电探空温度廓线与用经验正交展开得到的温度廓线比较

——无线电探空温度廓线;
——用经验正交展开得到的温度廓线

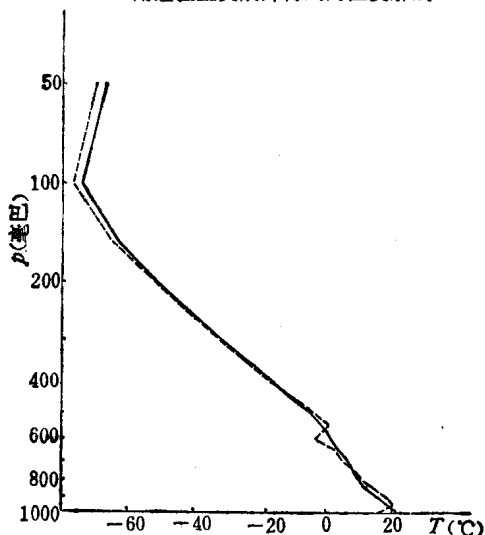


图7 广州1970年11月16日12时00分(世界时)无线电探空温度廓线与用经验正交展开得到的温度廓线比较

——无线电探空温度廓线;
——用经验正交展开得到的温度廓线

种细微结构则往往反映不出来。

三、测气温垂直廓线通道数的决定

首先让我们考察一下辐射传输方程: