

# 大气遥感的现状与前景

周秀骥

大气遥感是从六十年代初开始系统形成的新型大气探测方法。经过近二十年来的蓬勃发展，已初步成为大气科学中一个新兴的分支领域。

大气遥感的兴起是大气物理和近代科学技术结合的产物；是气象观测发展历史中辩证的螺旋式上升的一次飞跃。气象观测从古代朴素的看天象、物象，进入到定量的气象仪器观测时代，是气象科学质的飞跃。在这个时期，从地面观测中的器测项目，直到自动气象站、无线电探空、飞机观测以及火箭探空，尽管运载工具和无线电遥测技术有很大进展，但作为观测原理，基本上都属于直接气象观测。它只有把各种感应元件直接和大气某点相接触时，才能测定该点大气温、湿、压、风等。这就在时间和空间上给大气探测带来难以克服的局限性。

大气遥感是一种从观测原理上根本区别于直接气象观测的间接大气探测，它不需要直接与大气接触，就可以从遥远的地方定量地感知大气物理状态、化学成分等特征的时空分布。这种遥感原理所以能够实现。是因为实际大气中可以存在和传播着各种力学波、电磁波等大气物理信号，它们和大气发生紧密的相互作用，从而储存了大气运动和变化的天气气候信息（以下简称为大气信息）并向远处传播。只要我们弄清大气物理信号形成和传播的物理机制和规律，善于接收并分析它们，从中提取大气信息，就实现了大气遥感。有意思的是，古代劳动人民早就开始应用的用感觉器官接收天象、物象等物理信号，积累经验，预测天气，原则上也属于遥感范畴。然而，只有在近代大气物理学和近代空间技术、激光、微波、红外与计算机技术等充分发展的基础上，才形成了科学的大气遥感探测学，使气象观测又发展到一个新阶段。

近代大气遥感研究内容可用附图概括地表示。它

基本上由两部份组成：（1）大气信号物理学；（2）大气遥感技术。

大气信号物理学是大气遥感的理论基础。它主要研究可能存在和传播于大气中的各种物理信号；不同天气气候条件下大气中各种物理信号的特征；物理信号在大气中形成和传播的物理机制与规律；从物理信号中定量地提取所含大气信息时空分布的理论与方法。由此可见，大气信号物理学也是大气物理学的重要组成部份。对于它的研究，必然牵涉许多重要的大气基本过程（辐射传输过程、动力过程、云雾降水物理和电过程等）。

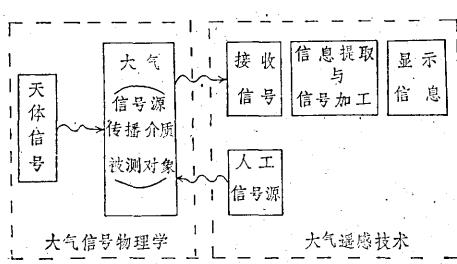
大气遥感技术实验研究则是实现各种大气遥感原理的技术保证。它基本上包括人工信号发射源、信号接收、信号加工和信息提取、信息显示等四部分。为了使人工源发射出来的信号，和大气相互作用以后，能够带回充分的定量可靠的大气信息，就要求各种非常稳定的、精确的人工信号发射源系统。同时，从大气返回的物理信号非常微弱，经常是混杂于强背景噪音之中，要从中精确地提取大气信息，必须进行复杂的信息处理。这一切没有近代计算机为基础的分析处理自动化技术几乎都是无法实现的。

因此，大气遥感研究既是探测技术的研究，涉及到近代新技术的应用。又是理论性研究，涉及到许多大气物理学的基本问题。它是大气物理学和近代新技术的结合。近二十年来，它从理论基础到实验技术和方法，已逐步形成一个相对独立完整的体系，构成大气科学中一个新的分支——大气遥感探测学。

由于大气遥感探测学内容十分广泛，这里不可能详细叙述，只能结合大气遥感发展现状与前景的概貌，就关于大力发展大气信号物理学基础研究；发展多波长激光雷达、微波雷达综合系统以及航天遥感发展的动向等三个问题，介绍一点情况，发表一点粗浅的看法。

## （一）大力开展大气信号物理学的基础研究

究竟有那些物理信号可能存在于大气，并和大气发生相互作用呢？经过长期的观测分析和理论研究，已经发现的物理信号是电磁波和力学波（主要是压力波）信号。大气中电磁波信号波段从紫外辐射直到极低频的无线电波，力学波信号从声波直到重力波，这



附图 大气遥感探测学系统

些信号的来源是：(1) 大气本身的发射；(2) 天体射向地球大气的辐射；(3) 人工辐射源的发射。

前两种信号源是自然源，它不能按人们主观需要来控制，往往把利用它们来进行探测称为被动式大气遥感。而把用第三种信号来进行探测称为主动式大气遥感。

首先，在力学波辐射信号方面，由于声波在湍流大气中传播的理论研究卓有成效[1]，比较成熟的声音雷达技术很快被应用于大气遥感。当前，在美国和澳大利亚，利用声雷达遥感能够连续、快速地探测高度1 km 左右边界层大气风速、风向、温度层结以及湍流统计结构特征的廓线分布，对揭露边界层大气中逆温层结的生消过程、热对流发生发展、重力波与湍流相互作用等规律，起了重要的作用。我国从七十年代初开始了声雷达研制工作，已取得科研成果（见《大气科学》1976年第1期）。

远在声雷达之前，灵敏的气压计就记录到大气中存在着各种压力波，现在最灵敏的微压计已经可以检测到  $0.01 \mu b$  的压力波信号。通过长时期的观测表明，大气中压力波信号的频谱很宽，约从  $10^{-4}$  赫到几百赫。这种压力波信号往往和台风、强风暴、龙卷、冰雹与冷锋等强烈天气系统密切相联。因此，人们早就企图利用这种信号来监测灾害性天气。直到现在，根据压力波来远距离探测台风的位置和强度；从判断雷声特征来识别冰雹云（见本刊1975年第8期）等还吸引着我国气象工作者的注意。在国外，由于气象卫星（特别是地球同步气象卫星）监测台风已非常成功，所以他们主要是利用大气压力波信号来监测和研究龙卷与强风暴。他们采用灵敏的微压计在10km 内布阵观测，可以监测到近1000km 远处的强风暴[2]。同时发现，强风暴和龙卷等内部的强对流活动可以在电离层内激发重力波（波周期为13—15分），并且用地面电离层多普勒观测系统记录这种波信号，提前预测强风暴活动[3]、[4]。

尽管如此，压力波信号遥感探测还处于研究阶段，远未达到应用阶段。关键是大气中压力波信号物理问题非常复杂。首先，在大气中压力波信号的自然源很多，火山活动、流星堕落、海浪运动、磁暴与极光都可以在大气中激发压力波，在全球传播。而大气本身的强对流运动、涡旋运动、湍流运动等都是压力波信号源。尤其是压力波和大气热力、动力场背景结构有十分紧密的联系，在传播一定距离以后，原来信号特征往往面目全非。要从中反演提取波源处大气信息，就必须精确掌握其传播规律。遗憾的是，长期以来这些信号是被当作“气象噪音”滤掉的。因此，从利用信号的角度，对大气压力波信号形成和传播物理机制的研究还很不系统。从理论上根本解决上述这些问题，是今后压力波信号被动遥感发展的关键。

此外，大气动力学研究表明，在大气热力场以及动力场的适应过程中，可以激发出从声波到重力波信号，它们向四周传播，同时把不平衡能量频散到整个空间。因此，如何从大气压力波信号场中提取强对流和大气适应动力学过程的大气信息，是非常值得努力探索的问题。

其次，对大气电磁波信号物理学的研究，相对地要成熟得多。现在可以肯定的物理效应主要有：(1) 电磁波在大气中传播的效应；(2) 大气热辐射效应；(3) 大气射电辐射效应。

第一，电磁波在大气中传播的主要物理效应是折射、散射（经典散射与量子散射）和吸收。其结果是，随着大气物理状态和成份组成不同，电磁波信号的频谱强度、波速、位相和偏振度等物理量发生多种强烈的变化，包括着丰富的大气信息。从十九世纪以来，由于电磁波散射理论[2]、分子光谱量子理论[2]以及湍流大气中电磁波传播理论[1]的相继建立，完全奠定了电磁波信号物理学的理论基础。在此基础上，利用电磁波传播效应遥感大气最有成效的例子是五十年代微波气象雷达和六十年代末激光气象雷达，它们代表着今后大气遥感发展的一个重要方向。

此外，在看天经验中的曙暮光和朝霞，是位于近地平线上下太阳可见光辐射通过长距离大气层传播后的大气光学效应，它们包含着远处的大气信息。利用辐射传输理论，建立考虑多次散射效应的非均匀球形实际大气的光学模式，就可以真正把群众经验提高到客观定量的科学阶段。根据近代湍流大气中电磁波传输理论，完全肯定了星光闪烁反映着大气风场和湍流场的结构分布[1]。运用这个基本理论，我们找到了从光闪烁效应中反演大气风场和湍流统计特征廓线的理论方法[5]，并成功地取得数值试验结果。上述两个方面的理论和观测实验工作都非常值得深入。

第二，大气热辐射信号主要来自大气分子内部结构变化的能量跃迁。在大气条件下，对大气遥感有效的热辐射主要集中在红外和微波波段。大气中氧气、二氧化碳、水汽、臭氧及其它成份都有其特征的热辐射波段，其辐射强度完全依赖于气体密度及温度。因此，原则上可以利用热辐射信号遥感大气气体密度及温度。当前，同时利用大气红外和微波热辐射信号，在气象卫星上已经成功地取得从地面到高空80km 左右的大气温度廓线，均方根误差为  $2-3^{\circ}\text{C}$  并正进一步提高。同时，这一技术也扩展到地面微波大气遥感。近几年来，我国对大气热辐射信号遥感大气进行了许多研究工作，在红外遥感和微波遥感大气温、湿及降水强度等等理论与观测实验方面都取得很好的成果。但是，利用大气热辐射信号，从卫星上遥感对流层大气水汽等气体成份浓度廓线分布，还遇到一些困难。

此外，有两个方面的动向值得注意。其一是利用大气临边热辐射信号从卫星上探测平流层中层大气微量成份浓度，这对研究高层大气辐射平衡和光化学动力学具有十分重要的意义。其二是从大气热辐射信号起伏的统计特征中，推算大气动力场结构。事实上，国外早就通过观测发现，大气热辐射信号是起伏的，其起伏强度一般为 $0.1\text{--}1\text{K}$ 。主要由大气湍流和风造成；我们通过理论分析，找到了大气热辐射信号起伏统计特征与大气风和温度湍流结构常数廓线之间的关系。

第三，大气中还存在着频率极为宽广的无线电波，它们不属于热辐射，而是由于大气电活动过程引起的电磁波辐射。闪电的无线电波辐射就是一个最明显的例子。我国著名气象学家顾震潮生前曾把这类大气无线电波辐射统称为大气射电辐射，并提出开展“射电气象学”研究的设想。他认为，除闪电外，从大气离子运动直到云、降水和雷电形成的各个发展阶段，都会发射出不同特征的射电信号，利用它有可能监测识别灾害性天气并研究云和降水的物理过程。在顾震潮同志指导下，我们曾进行了我国大气射电特征观测、水滴变形破碎过程中发射电磁波的模拟实验以及雷电单站定位的原理试验等等研究工作。在国外，也先后观测到在雷电形成前，对流云就有和闪电射电特征不同的辐射。在模拟实验中，也观测到在两个荷电水滴碰并时，可以发射出频率为 $3,291\text{--}10,940$ 兆周的射电辐射，并找到信号强度与水滴半径和荷电量之间的关系。此外，国内外的长期观测都表明，冰雹云有其特殊的射电信号。根据已有研究结果和大气物理理论，可以预言，水滴碰并、冰晶化、冰雹形成、雷电、强对流内电活动等都能够发射出其特有的射电信号。遗憾的是，研究它们物理机制的工作还太少。

综上所述，大气遥感的发展不仅取决于新技术的应用，还必须以大气信号物理学理论为坚实基础。我国大气遥感要创造性地超过世界先进水平，必须系统地大力加强大气信号物理学研究。

## (二) 发展多波长激光与微波气象 雷达综合探测系统

近代大气科学面临两个重大而困难的课题：一是中小尺度大气运动规律；二是全球大气环流与气候变化的物理机制。对于第一个课题，一个多波长激光与微波气象雷达综合探测系统将是十分有用的工具。而航天遥感则为第二个课题提供资料展现新的前景。为了掌握 $100\text{ km}$ 内中小尺度大气运动和物理过程，利用探空和地面气象站组成稠密观测网，开展综合观测试验是一条基本途径。而大气遥感探测手段将在其中起重要作用，特别是对掌握 $10\text{ km}$ 左右及更小尺度大气运动规律来说，靠大气遥感来获取时空分布的探测资料是必不可少的。

众所周知，cm 波气象雷达在研究中小尺度天气现象中已经发挥了重要作用。特别是脉冲多普勒微波气象雷达的问世，突破了对流云降水区域流场结构的探测。但要指出，cm 波只能和大气降水粒子发生有效的相互作用。cm 波雷达资料只能反映降水区域的大气信息，而这往往是天气系统发展到最后的结果。要了解从晴天热对流开始发生发展直到降水形成的全过程，以及降水区域周围动力场与热力场结构的背景条件，光靠 cm 波雷达是远远不够的。近年来，在探测大气晴空湍流和对流运动方面，一些高功率 cm 波和 dm 波雷达起了一些作用。连续波调频雷达 (FM-CW) 在边界层现象探测中也较为活跃。但探测能力都有较大局限性。比较起来，还是迫切需要依赖激光气象雷达和 mm 波气象雷达来解决。

激光是 1960 年问世的新技术，目前发展正方兴未艾，前景诱人。国外从 1963 年开始就把激光技术应用于大气探测，发展迅速，已从地面激光大气遥感发展到机载激光大气遥感，计划到八十年代，使激光大气遥感成为航天遥感大气的重要手段之一。

目前的激光雷达波长范围已经甚为宽广，从发射紫外辐射直到中红外辐射，并正向更长波段发展。特别是可调谐激光器研制成功以后，可以连续地调节一个激光雷达的发射波长，给遥感大气气溶胶微粒和气体成份、浓度与物理特征提供了十分有效的手段，因此它在大气探测中应用的研究进展很快。在大气中传播时，激光和大气分子、气溶胶微粒、云滴、降水粒子等都发生弹性散射、非弹性散射和吸收的强烈作用，从而储存了大气成份、动力场和热力场等丰富的信息。但是，在浓云、雾中激光衰减很大，传播距离十分有限。而再继续增大发射功率，强功率激光就会剧烈破坏原有的大气物理状态。因此，激光气象雷达是晴空和一般稀薄云雾条件下大气探测的好工具。

当前，国外利用激光气象雷达和多普勒激光雷达，已经成地取得大气水汽、温度、风和湍流结构廓线的探测结果。探测高度在 $3\text{ km}$ 左右，资料质量可以和目前一般探空资料相比拟。根据现有技术发展速度，探测范围延伸到 $10\text{ km}$ 左右，取得 $10\text{ km}$ 尺度时空分布的观测资料，是完全有潜力可以实现的。这样，对揭露 $10\text{ km}$ 左右大气水汽场、动力场和热力场结构演变与非线性相互作用的物理机制，掌握从晴空对流的发生发展直到云生成的全过程规律，多波长激光气象雷达及多普勒激光气象雷达将提供崭新的观测资料。

此外，激光气象雷达，尤其是可调谐激光气象雷达，对探测平流层中层大气密度，对流层、平流层和中层大气气溶胶微粒与 $O_3$ 等气体成份的物理特征，大气污染浓度和扩散规律，水平与斜视能见度等方面都起了十分出色的作用，是其他遥感技术难以比拟的。已有的

研究结果表明，激光遥感是研究平流层光化学动力学与大气成份变化对气候变化影响的重要手段。

我国早在1966年末就研制成了和美国当时水平相当的激光气象雷达<sup>[6]</sup>。以后在激光测云、激光探测低层大气光学特性、激光探测人工烟云浓度和污染扩散、激光探测大气水平和斜视能见度等研究方面取得一些成果，激光测云仪已定型投产。但总的看来，我国激光遥感现在已比国外落后很多，需要加速发展。

在激光雷达和cm波雷达探测之间还有一段空白区需要填补，那就是对从云生成后到降水形成过程的探测问题。这只能依靠mm波气象雷达来完成。目前比较成熟的是8mm气象雷达。用这个波长进行遥感探测，大致可以提供非降水浓云中含水量和风、湍流等动力结构时空分布的观测资料。此外，根据我们近几年理论分析与观测试验结果，把微波雷达和同波长的微波辐射计联成一个有机的综合系统，可以显著提高定量探测云中含水量和降水强度时空分布的稳定性与精确度，而且在技术上也不难实现。

最后，迅速发展我国激光气象雷达与微波气象雷达信息处理自动化技术是刻不容缓的课题。我国目前气象雷达信息处理方式基本上还停留在定性阶段。大量有用的大气信息无法提取，白白浪费。和国外相比，我们整整落后一个阶段。信息处理技术在大气遥感中有极其重要的地位，国外由于普遍采用了高精度高速度模数转换技术、微型处理计算机系统以及多层次彩色显示技术，特别是彩色层次多达二百多个的激光彩色合成技术，使地球环境遥感资料的应用价值发生了质的飞跃。

所以，发展建立多波长激光气象雷达、mm波气象雷达和cm波气象雷达的综合探测系统，对解决中小尺度大气科学问题是十分迫切而重要的。当然，这要经过多年的努力，但应该成为我国大气遥感赶超世界先进水平的一个重要课题。

### (三) 航天遥感发展的动向

从1960年到现在，气象卫星有了近二十年的发展历史。无疑地，它在监测台风等灾害性天气和改进天气分析中做出了突出的贡献，已成为天气预报业务的重要工具。八十年代的航天大气遥感究竟如何发展？根据现有的片断资料，以下三方面动向是值得重视的。

#### 1. 主动式大气遥感将成为航天气象探测中的一个重要手段

在六十年和七十年代，气象卫星上基本采用了被动式大气遥感系统，它主要在探测海面温度、大气温度廓线、云的特征和根据云的移动估计该层大气风场等方面取得了出色的结果。同时，建立临边辐射遥感原理，为探测平流层中层大气开辟了新的途径。但到

八十年代，预计主动式大气遥感技术将愈来愈多地被应用于航天气象探测。因为，空间技术、微波雷达、激光雷达技术发展迅速，日益成熟。被动式大气遥感虽然技术上相对简单一些，但在探测原理上却存在许多根本性困难。例如低层大气水汽廓线的反演，在空间无论是用红外遥感还是微波遥感，都遇到严重的障碍。至于被动式航天遥感大气风和湍流，其探测原理还未完全解决。而采用主动式大气遥感，则从探测原理上避免了这些困难。

其实，从七十年代开始，美国宇航局就非常重视主动式航天大气遥感系统研究，主要提出了一系列用激光雷达进行大气遥感的计划和方案。并且进行了许多机载试验。计划在八十年代将它应用于航天大气遥感，来取得云顶空间变化、高层卷云结构分布、大气气溶胶微粒特征、对流层与平流层大气成份等观测资料。更值得注意的是，美国宇航局戈达德飞行中心宣布，利用激光遥感技术，可以从空间测定地面气压，测量误差仅0.2%。此外，还提出了用星载多普勒激光雷达，探测全球风场结构，其测量精度达1m/s的计划。由此看来，八十年代航天大气遥感的面貌可能会有巨大变化，将逐步进入被动式大气遥感和主动式大气遥感相结合的阶段。

#### 2. 航天遥感将是实施世界气候规划的重要探测方法

大气环流与气候变化物理机制研究是近代大气科学的重大课题。为此，国际上正准备实施世界气候规划、全球环境监测系统、美国气候规划等三个规模宏大的全球研究协作规划。

根据近代动力和物理气候模式，为了进一步揭露大气环流与气候变化的物理机制，在这些规划中普遍认为必须进行全球完整的海洋、大气、辐射收支、水分循环、冰雪等分布的观测。只有航天遥感技术才能完成这个任务。因此，美国宇航局正制定一个综合的地球环境卫星系列。其中除了地球资源卫星、泰勒斯-N气象卫星、地球同步气象卫星和发射海洋卫星(SEASAT)以外，还计划于1983年发射气候卫星-A(CLIMSAT-A)，1985年发射气候卫星-B(CLIMSAT-B)。这个地球环境卫星系列的观测项目和资料将相互配合，相互补充。每种卫星除了其本身特定的任务外，将全面提供上述陆地、大气、海洋所需要的观测资料。这些综合资料对研究大气环流与气候变化的物理机制，无疑会有巨大的推动作用。

#### 3. 航天遥感将成为大气科学研究的重要工具

在气象史上，只有卫星云图资料比较快而成功地应用于日常天气预报业务。大气温度廓线的航天遥感试验成功以后，本来以为会显著提高数值天气预报，事实并不尽然。原因是多方面的，关键是许多大气运动基本机制和规律还不清楚。因此，应该注意使航天

遥感成为大气科学研究的重要工具，成为揭露大气运动规律的有效手段，进而更好地为气象业务服务。事实上，这种看法已愈来愈受到重视。在所谓第三代泰勒斯—N气象卫星系列上，其中许多观测项目实际上完全是为第一次全球大气试验和世界气候规划研究服务的。八十年代计划发射的气候卫星更是全部为研究服务的。此外，由英国、美国、瑞士和西德共同制定了一个“微波红外中层平流层实验”(MIMSE)计划，将从1980年开始由欧洲空间局组织实施。主要内容是发射空间实验室(SPACELAB)系统，开展大气科学的研究。其中将采用激光气象雷达、综合孔径微波雷达、mm波临边探测系统、多通道微波辐射计、致冷红外辐射计、平流层中层红外探测系统等先进的大气遥感技术。重点研究课题是太阳活动对大气环流的影响，平流层中层光化学动力学及其与对流层大气相互作用的物理机制。总的来说，航天遥感要扩大在日常气象业务上的使用还是一个曲折发展的过程，它在大气科学的研究中充分发挥作用的比重有逐步扩展的趋势，这是和大气科学本身现状密切相关的。

我国大气科学要实现现代化，发展航天大气遥感是势在必行的。我国航天大气遥感，决不能沿着国外六十年代和七十年代路子慢腾腾地走。我们必须瞄准

国际先进水平，迎头赶上，而从现在起，就要争取时间，为八十年代的水平而努力奋斗。

## 参 考 资 料

- [1] Tatarski V.I. The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation. 1971.
- [2] Derr V.E(ed.). Remote Sensing of the Troposphere. 1972.
- [3] Hung R. J. Race Tracing of Gravity Waves as a Possible Warning System for Tornadic Storms and Hurricanes. J. Appl. Met. 1978. 17(1).
- [4] Hung R. J. Remote Sensing of Severe Storms by Using Ionosphere Doppler Observations. Proc. Solar-Terr. Physics. 1978.
- [5] 大气遥感探测问题研究(一) 大气物理研究所集刊第5号 1977
- [6] 激光在气象探测中的应用 大气物理研究所集刊第1号 1973