



气象使用无线频谱手册
天气、水、气候监测和预测
2017年版





手册

气象使用无线频谱： 天气、水、气候监测和预测

2017版

无线电通信局



注

ITU和WMO出版物中所用的称号和本出版物中的材料表示方式并不代表ITU和WMO对各国、领土、城市或地区、或其当局的法律地位、或对其边界划分的观点立场。

ITU和WMO出版物中的观点是作者的观点并不代表ITU和WMO。提及的具体商号或产品与未予提及或未刊登广告的同类相比并不表示前者得到了ITU和WMO的赞许或推荐。

涉及编辑及要求出版、重印或翻译本出版物（条款）全文或部分须联系：

世界气象组织（WMO）

出版委员会主席

7 bis, avenue de la Paix

P.O. Box 2300

CH-1211 Geneva 2, Switzerland

电话: +41 (0) 22 730 84 03

传真: +41 (0) 22 730 81 17

电子邮件: publications@wmo.int

ITU

978-92-61-24875-8（纸质版本）

978-92-61-24885-7（电子版本）

WMO

WMO-No. 1197

978-92-63-51197-3（电子版本）

© WMO-ITU 2017

以印刷、电子和任何其它形式以及以任何语言的出版权归ITU和WMO所有。未经ITU和WMO事先书面许可，不得以任何方式复制本出版物的任何部分。

前言

“气候变化可能会对生态系统和全人类未来的繁荣、安全和福祉造成灾难性的影响。潜在的后果可涉及几乎可持续发展的所有方面 - 从粮食、能源和水安全到更广泛的经济和政治稳定。”

联合国秘书长安东尼奥·古特雷斯

世界气象组织世界气象大会（2015年，日内瓦）

决议29（Cg-17）：

考虑到：

(1) 灾害的探测和早期预警以及**生命财产安全、环境保护、气候变化研究和科研**等所需的气象和相关环境活动的具体无线电通信服务**至关重要**；

...

强调

鉴于一些无线电频段具有可促进大气和地球进行空基被动遥感的特有属性和自然辐射，这些频段已成为独特的自然资源，因而应适当分配给地球探测卫星服务（被动）和应当进行绝对保护免受干扰；；

...

敦促所有会员

尽最大努力争取并保护适用的无线电频段；

...

呼吁国际电联及其成员国主管部门

(1) 因其特殊的物理属性，无线电频段成为可进行空间被动大气和地表被动传感的自然资源，其对于天气、水和气候研究和运行是至关重要的，应确保对无线电频段的可用性以及获取和绝对保护；

(2) 对WMO有关气象和相关环境业务和研究所用无线电频率分配和法规条款方面的需求给予应有的重视；

...

国际电联世界无线电通信大会（2012年，日内瓦）第673号决议（WRC-12）：

“考虑到

...

b) 地球观测数据在监测和预测气候变化、灾害预测、监测及减灾、增加人们对气候变化各个方面的了解、建模和验证，以及制定相关政策等方面亦有关键作用；”

...

e) 在世界各地开展了多种观测，都需要在全球范围内考虑与频谱有关的问题；

...

h) 开展地球观测是为了整个国际社会的利益，数据通常是免费提供的；

...

决定

1 继续认可地球观测对频谱的利用具有相当的社会和经济价值；

2 敦促各管理部门考虑地球观测的无线电频率需求，尤其要保护地球观测系统的相关频段；

3 在做出会给地球观测业务造成不利影响的决定前鼓励各管理部门考虑地球观测频谱的利用及可用性的重要性。”

在1970和2015年间，全世界共发生了12000多起自然灾害，夺去了350多万人的生命并预计造成了超过2.7万亿美元的经济损失。这些自然灾害的90%、超过60%的人员伤亡和70%的经济损失都是由干旱、洪水、严重风暴和热带飓风等与天气、气候和水相关的灾害以及与气象和水文条件直接相关的健康流行病和昆虫侵袭。随着气候变化，这些极端事件不断加剧，成为“我们这个时代最大的挑战”，如果不加以解决，将继续加剧。有绝对的科学证据表明，气候变化将威胁到几乎所有国家的经济增长、长期繁荣和社会福利以及最脆弱人口的生存问题。

在了解和应对气候变化及其影响方面，观测和监测技术及基础设施发挥了关键作用。目前，星载和位于地球表面的遥感仪器（例如天气雷达）等基于无线电的应用提供了地球大气和表面信息的主要来源。反过来，这些信息被用于气候、天气和水监测、预测和告警，降低自然灾害风险，支持救灾行动和为适应和减轻气候变化的负面影响而规划预防性措施等。

在这方面预见的领域包括：继续开展太阳活动观测和长期监测以改进我们对太阳电磁辐射对地球环境（包括气候）影响的了解和认识；继续开展观测以总结大气、海洋、陆地表面和冰冻圈变化的特征以及使用此类信息进行气候变化模拟；继续观测臭氧层的变化及其对环境 and 人类健康的影响。对于可持续管理自然资源、环境保护、粮食安全、气候变化和人道主义计划来说，土地覆盖变化评估以及了解其动态是基本的要求。地面和卫星无线电通信系统有助于监测碳排放、极冠和冰川的冰变化以及温度变化。

19世纪末成立的国际电报联盟和国际气象组织，分别发展为国际电信联盟（ITU）和世界气象组织（WMO），超过140年以来，全球气象和电信机构之间的协作和伙伴关系取得了丰硕的成果。WMO的工作重点是满足环境信息和对应的用于标准化天气、气候和水文应用的无线电频谱的需求，而国际电联作为无线电频谱的主管机构，负责为用于气候监测与预测、天气预报和灾害早期告警与发现等无线电应用和无线电通信系统（地面和空间）的操作不受干扰而划分必要的无线电频率。

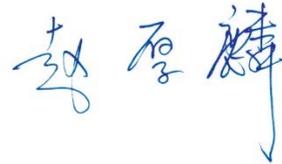
连续多次的国际电联无线电通信大会都考虑了WMO的需求，以确保为无线电探空仪、天气和风廓线雷达以及空基红外与微波探测器等大气和其他环境观测工具提供无线电频段并对其进行保护。

此次新版的《用于气象：天气、水和气候监测与预测手册的无线电频谱》是在ITU-R无线电通信第7研究组（科学业务）主席M. Dreis先生（EUMETSAT）和Eric Allaix先生（法国）的领导下，由ITU-R 7C工作组与WMO基本系统委员会（CBS）的无线电频率协调指导组的专家共同编写。

该手册提供了现有观测应用和系统以及气象系统所使用无线电频率方面的详尽记述和操作信息，包括气象卫星、无线电探空仪、天气雷达、风廓线雷达和空基遥感仪器等。本书适用于气象（即天气、水和气候）和无线电通信界人士（包括政府机构、业界和普通大众）。



Petteri Taalas先生
世界气象组织秘书长



Houlin Zhao先生
国际电信联盟秘书长

目录

页码

前言	ix
引言	xi
第1章 – 气象系统的一般结构.....	1
第2章 – 卫星气象业务 (MetSat)	9
第3章 – 气象辅助业务.....	21
第4章 – 气象雷达.....	37
第5章 – 用于气象活动的无源和有源航天遥感.....	71
第6章 – 用于气象活动的其它无线电通信系统.....	99
附件1 – 气象学中常用的首字母和缩写.....	109

前言

负责科学业务的无线电通信第7研究组创建于1990年在德国杜塞尔多夫召开的国际无线电咨询委员会（CCIR）全会进行的一次结构调整中。

第7研究组由一些负责与科学业务范围内特定学科有关的技术事项的无线电通信工作组（WP）组成。气象和与环境有关的活动属于7C工作组（WP 7C）的职责范围。WP 7C负责开展与从地基和空基平台以及气象辅助（主要是无线电探空仪）的气象无源和有源传感器的实施和操作有关的研究。因为气象也依赖于无线电收集其预测所需的各项数据和处理并播发公众提供的信息和告警，所以该项活动与WP 7B也有关。最后，人们也会注意到，WP 5B也在一般无线电定位业务的范畴内研究气象雷达和风廓线雷达。

气象是我们日常生活的一个重要组成部分且与我们日常生活和活动密切关联。如今，天气预报是电视或广播中最受欢迎的节目之一。天气预报不仅影响到我们每天的穿着或行动安排，还牵涉到公共安全的各个方面。公共交通高度依赖天气预报。准确地预报天气的能力对于向社会提供高水平的服务至关重要，包括特别是诸如交通、航空等保护生命和财产的多个领域。。在气象和气候极其紊乱的现阶段，该项活动在预测、发现和降低自然灾害的负面影响等方面发挥着主要作用。

制定建议书和准备世界无线电通信大会（WRC）是研究组活动的重点。第7研究组的专家不仅要与那些工作依赖于气象数据来改进天气和气候预测准确性的同行分享该信息，还要与范围更广的受众分享信息，以便感兴趣的人士理解将特定频率用于气象用途的重要性以及保护这些频率的方法，以便以尽可能最高程度的可靠性继续进行气象预报。

因此决定与世界气象组织（WMO）的无线电频率协调指导组（SG-RFC）合作起草并出版本手册，以便这些标准的所有用户可以更完整地理解气象系统，更好地设计并应用这些强大的工具。该《手册》的一个主要目的是向读者提供关于气象人士和其它世界各地关注环境活动的科学家使用无线电系统和无线电频率（RF）频段的信息以及这种使用对公共安全和世界经济的重要性。

对划分的频段进行有效和谨慎的管理，对于维持和改进天气和与天气相关的预测的质量和准确性至关重要。例如，有必要理解，现在划分给气象用途的一些频段如果由与气象无线电系统不兼容的其它无线电系统所使用，那么这些频段可能不能再用于天气、气候和/或灾害预测系统，由此使得相应的天气预报极其困难，但有了所需程度的可靠性和准确度也不是不可能。

作为第7研究组的主席，我非常荣幸地向气象标准用户界和频率管理界推荐本《手册》。我相信，你们将在本职工作中发现该手册是一个重要的参考工具。

由于参与第7研究组和SG-RFC的许多主管部门贡献的力量，本《手册》才得以完成。此外，本《手册》各章节的报告人所承担的工作尤其出色，应特别感谢David Franc先生（美国）、Gilles Fournier先生（加拿大）、Eric Allaix先生（法国）、David Thomas先生（WMO）以及Philippe Tristant先生（EUMETNET）和Markus Dreis（EUMETSAT）在该项目中发挥的领导作用。

还要特别感谢无线电通信局Vadim Nozdrin先生在本《手册》的出版过程中发挥的重要作用。

John Zuzek
无线电通信第7研究组主席

引言

及时预警自然灾害和环境灾难、精确的气候预测和详细了解、对生物质能、生物圈、矿产资源、水和能源等稀缺资源的保护和有效管理是可持续经济发展的基本要求。关于气候、气候变化、天气、冰冻圈、降水、污染或灾害的信息对国际社会是至关重要的日常事项。监测活动提供的信息是日常天气预报和预测、研究气候变化、保护环境、经济发展（交通、能源、农业、建筑、城市发展、电厂建设、农业、安全）以及生命和财产的安全所必需的。地球观测资料还可用于获取有关自然资源的相关资料，这对于发展中国家尤为重要。重要的是不要忘记这种信息是基于由无线电通信系统的测量结果，也是利用无线电通信系统进行收集、提供和分发的。无线电系统是监测气候、帮助各国减轻和适应气候变化影响、以及应对其主要挑战的基础。使用无线电频谱进行操作的任何无线电系统都使用有限的稀缺资源。提供免受有害干扰的无线电频段是所有地球观测系统发展的要求。

用来收集和传播这种信息的系统需要可靠地获得从几kHz到数百GHz范围的无线电频率并采用无线电通信（如无线电探空仪或卫星）、天气雷达（降水和风廓线仪、以及用于空间的有源传感器）和空基、地基和无线电探测（如无源卫星遥感或闪电探测）等各种无线电技术。

这些无线电频率应用是相互关联并协助构成了一个全球气象系统；该系统任何一个无线电组成部分的缺失，无论是与观测还是与数据播发有关，都有可能危及到整个气象处理进程，这一点是不言自明的。

也应强调，使用这些频率的系统在天气、水和气候相关的灾害的发现、告警和预报方面发挥着重要的作用。由于这些灾害占自然灾害总数的90%以上，这些系统是全灾害类型紧急和灾害早期告警与救灾系统的重要组成部分。

新型、大规模营销和增值无线电应用的发展对于气象用途的无线电频段带来了越来越大的压力，这导致了限制未来气象应用的潜在风险。特别是对卫星无源遥感所带来的风险，该种业务涉及在数个无线电频段测量非常低的自然发射辐射。这些频段对多个地球物理变量敏感，因此必须联合使用才能获得多个不同的数量。如此需要的无线电频率由基础物理学决定且不可变更。持续的利用这些频段进行观测对于监测和评估气候变化也同样至关重要。

频谱的气象用户必须时刻警惕并不断解决与其它无线电通信业务共用频谱的问题。认识到人身和财产安全、环境保护、气候变化研究和科学研究所需的气象与相关环境活动的特定无线电通信业务的积极重要性，世界气象组织（WMO）决议29（Cg-17）呼吁国际电信联盟（ITU）及其成员国主管部门：

- 确保对无线电频段的获取和绝对保护，它们因其特殊的物理特性而对于大气和地球表面的空间被动遥感是独特的自然资源，并且对于天气、水和气候研究及运行是至关重要的；
- 对WMO有关气象和相关环境业务和研究用无线电频率分配和法规条款方面的需求给予应有的重视。

在这方面，上一次世界无线电通信大会（WRC）就保护气象和相关环境行动方面做出了一些重要决定。特别是WRC-15就做出了很多决定，为以下方面提供了更多的频谱：空间有源遥感的未来发展，与地球探测卫星进行通信的高数据率遥控链路，以及保护可能受新分配影响的无源观测波段。考虑到商业服务对频谱使用的需求不断增长，WRC-19和WRC-23将对气象界非常重要，事关保护其频谱和未来全球现代观测系统的发展。

为尝试正确地考虑这些研究，无线电通信第7研究组的7C工作组（遥感系统）和WMO的无线电频率协调指导组（SG-RFC）起草了《手册》修订版，旨在作为以下人员的指南：无线电气象系统数据的专业用户、这些气象系统所服务的人们和政府以及包括监管机构和无线电信业在内的无线电通信界。

本《手册》概述了使用无线电通信系统进行监测气候变化的各种情况及其影响，以及使用ICT和无线电通信作为全球减少能源消耗的解决方案。

本《手册》介绍了各种气象系统以及每一种系统技术和运营特性的概览和讨论。每一种气象系统的描述包括：采用的射频（RF）频段；预测竞争用户是否可能会产生有害干扰所采用的标准；关于公共安全的天气数据受损或丢失所产生的影响。为协助理解该复杂的领域，将讨论分成以下类型的系统：

- 1) 气象系统的一般结构
- 2) 卫星气象业务系统
- 3) 气象辅助业务系统，主要是无线电探空仪
- 4) 地基气象雷达，包括天气雷达和风廓线雷达
- 5) 用于气象活动的无源和有源空基遥感
- 6) 用于气象活动的其它无线电通信系统

为协助读者，文末附有首字母缩写词和缩语的简要汇编，并附有查找更完整气象术语定义的提示。

第1章

气象系统的一般结构

页码

1.1	世界天气监测网的气象系统	2
1.1.1	全球观测系统	3
1.1.1.1	表面观测	3
1.1.1.2	高空观测	4
1.1.1.3	雷达观测	4
1.1.1.4	海上观测站	4
1.1.1.5	飞机观测	4
1.1.1.6	卫星观测	4
1.2	其它WMO项目观测系统	7
1.2.1	WMO全球大气监测网	7
1.2.2	全球气候观测系统	7
1.2.3	水文和水资源项目	7
1.3	WMO综合全球观测系统（WIGOS）	7

1.1 世界天气监测网的气象系统

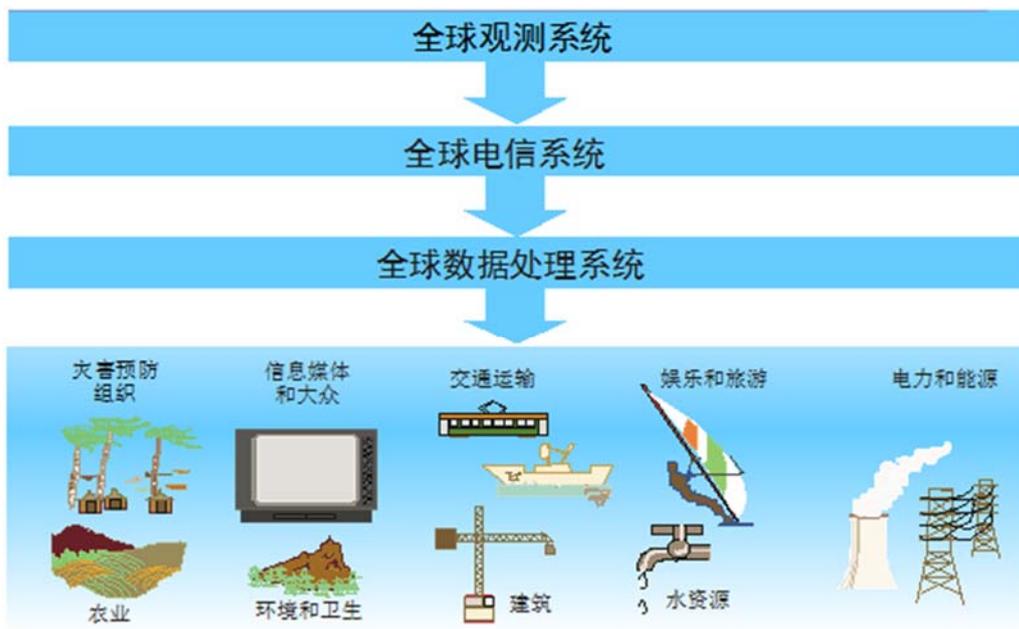
要分析、告警和预测天气，现代气象依赖接近实时的全球天气信息交换。世界天气监测网（WWW）是WMO项目的核心，它综合了191个会员国和会员地区运营的观测系统、电信设施和数据处理与预报中心，以获得在所有国家提供足够业务所需的气象和地球物理信息。

WMO对世界天气监测进行协调和监控，以便确保每一个国家每天都可以获得提供天气服务（分析、告警和预测）所需的所有信息以及长期规划和研究所需的信息。WWW项目一个越来越重要的部分为与全球气候相关、特别是与气候变化以及其它环境事宜和可持续发展有关的国际项目提供支持。

世界天气监测网（WWW）由以下三个综合核心系统部分构成（见图1-1）：

- **全球观测系统（GOS）** 从世界各地和外太空提供大气和海洋表面高质量、标准化的观测。GOS是WMO综合全球观测系统（WIGOS）的重要组成部分，情况简要说明如下。
- **全球电信系统（GTS）** 在各国气象和水文部门之间提供实时的气象观测数据、处理后的产品和相关信息。GTS是WMO信息系统（WIS）的重要组成部分，其利用的是专用地面和空基网络，包括无线电和视频广播技术。WIS还广泛使用互联网。
- **全球数据处理与预报系统** 提供由世界气象中心和专门的区域气象中心构成的网络生成的、经处理的气象产品（分析、告警和预报）。

图1-1
世界天气监测系统



1.1.1 全球观测系统

全球观测系统（GOS）是全球大气技术信息的主要来源，也是一个由测量气象和环境参数的复杂方法、技术和设施构成的组合系统。GOS确保向每一个国家提供关键信息，以每天生成天气分析、预报和告警。如图1-2所示，GOS由位于陆地、海上、飞机和气象卫星上的观测站组成。

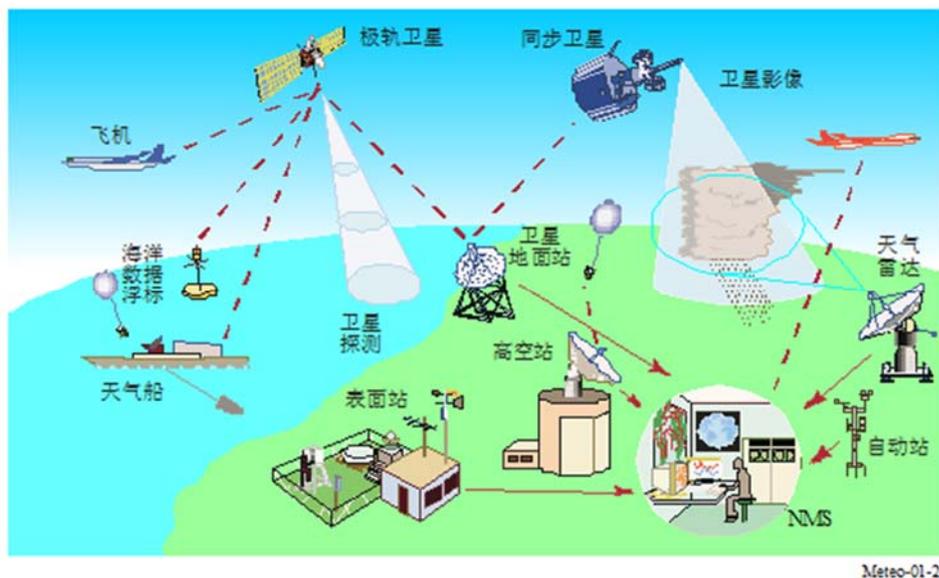
GOS最明显的好处是通过对本地暴风雨、龙卷风、飓风或热带以外和热带飓风等恶劣天气现象进行发现、预报和告警来保护人身和财产安全。GOS特别为包括气候和全球变化研究在内的农业微生物学、航空气象学和气候学提供观测数据。GOS提供的数据也用于支持各地的环境项目。

农牧业、运输、建筑、公共天气服务和旅游等一系列广泛的经济活动极大地受益于天气预报，这些天气预报延伸到数天、数周甚至数个季度以后。

关于GOS的详细信息，请查阅：<http://www.wmo.int/pages/prog/sat/satellitestatus.php>。

图1-2

WMO全球观测系统GOS



1.1.1.1 表面观测

表面系统的骨干仍是在地球表面或接近地球表面进行观测的大约10 000个陆上站。观测内容包括每隔一到三小时的气压、风速和风向、气温和相对湿度等气象参数。这些表面站观测到的一部分数据、全球气候观测系统（GCOS）表面网络也用于GCOS的气候监测目的。

1.1.1.2 高空观测

从世界各地大约900个高空站构成的网络中（代表着每年约800 000次发射），即在自由上升气球后面的无线电探空仪在从地面之上到30公里高度的范围内进行压力、风速、气温和湿度的测量。在海洋区域，由主要航行于北冰洋的大约20艘船舶进行无线电探空仪观测。这些船舶装备了船载高空自动探测设施。适合监测气候的一部分高空站构成了GCOS高空网络。

1.1.1.3 雷达观测

天气和风廓线雷达在空间和时间方面，特别是在大气低层高分辨率数据方面已经证明极其有用。天气雷达被大量用作国家网络的一部分并越来越多地作为区域网络的一部分，用于恶劣天气现象的短期预报。天气雷达对于估计降水量并在具备多普勒功能时进行风测量特别有用。风廓线雷达在气球探测之间进行观测特别有用，并有组成综合观测网络的巨大潜力。

1.1.1.4 海上观测站

在海上，GOS依赖船舶、系流和漂流的浮标以及静止平台。根据WMO船舶自愿观测项目（Voluntary Observing Ship Programme）召集的7 000艘左右船舶进行的观测收集与陆地站相关的变量并专门增加了海平面温度和波浪高度与周期信息。正在使用的漂流浮标计划包括约900个漂流浮标，每天可提供12 000个海面温度和海面气压报告。

此外，在联合国教科文组织（UNESCO）海委会（IOC）的支持下，在太平洋和印度洋与WMO合作建立了由成员国拥有并运营的海啸告警系统，并计划在其它海事区建立类似的系统；这些系统包括用于发现、早期告警和监控海啸的实时海面 and 深海传感器网络。

1.1.1.5 飞机观测

4 000多架飞机在飞行中提供压力、风和温度的报告。飞机气象数据中继（AMDAR）系统在巡航高度和上升与下降的选定高度进行高质量的风与温度观测。近年来，来自飞机的数据量极巨增长，估计已达到每天700 000份报告，相当于全球550个机场约90 000份AMDAR资料。这些系统为在只有很少或没有无线电探空仪数据的地方进行测量提供了巨大的潜力，并为GOS的高空部分做出了很大的贡献。

1.1.1.6 卫星观测

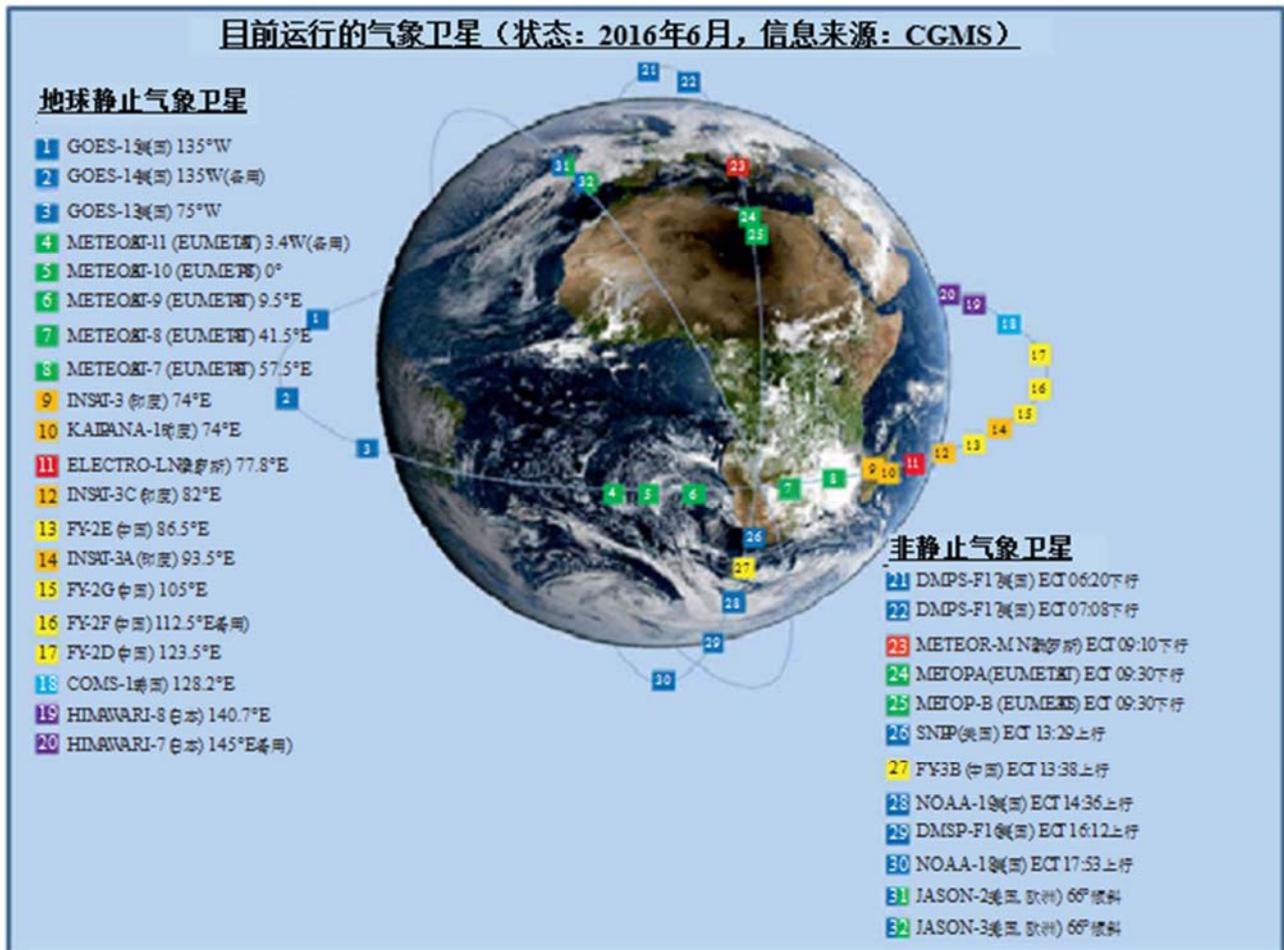
全球环境与气象空基观测系统由正在运行的静止和非静止（极轨和低空）观测卫星组成星座。目前业务运行的气象卫星概述见图1-3。

极轨和同步卫星通常装备有可见光和红外成像仪与探测器，从这些设备人们可以获得许多气象参数。这些极轨卫星中的几个装备了可以提供全球气温和湿度垂直廓线的微波探测设备。同步卫星可通过跟踪云和水蒸气来测量热带地区的风速。卫星传感器、通信和数据播发技术正在稳步发展，大量额外的卫星数据极大改善了天气和气候监测、告警与预报。

特别是在数字建模方面取得了进步，使得直接从卫星辐射中获得气温和湿度信息，制定越来越复杂的方法成为可能。近年来在天气和气候分析与预报，包括危险天气现象（暴雨、风暴、飓风）等影响所有人口和经济体的告警方面取得的令人瞩目的进展，在很大程度上得益于空基观测及其数字模型的播发。

图1-3

当前的WMO GOS业务气象卫星星座（状态：2016年6月）



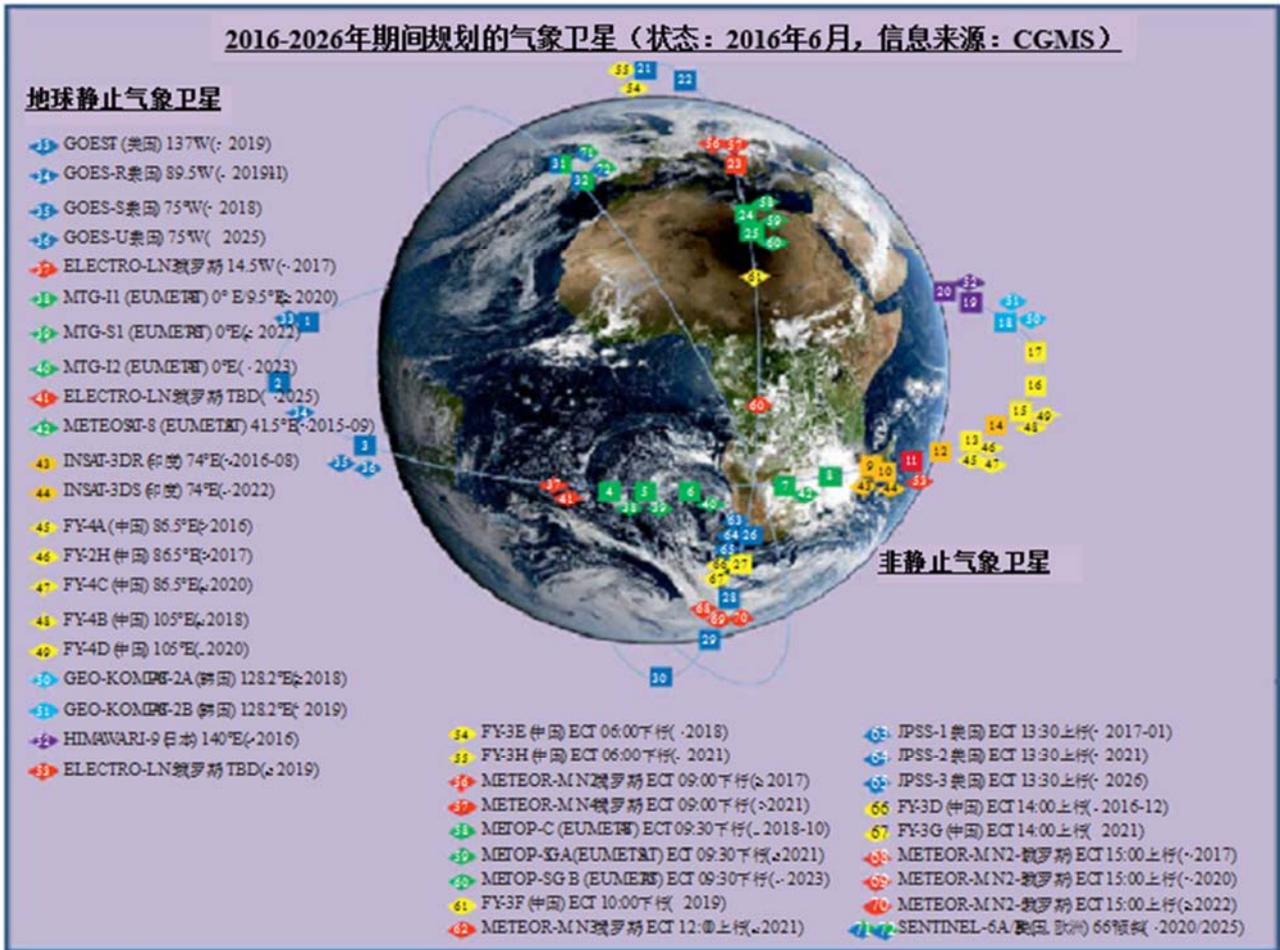
目前业务运行的气象卫星及其参数清单可查询：<http://www.wmo.int/pages/prog/sat/satellitestatus.php>。

为了提供空基气象观测的业务连续性，目前业务运行的卫星将由这一代气象卫星现有系列中的新卫星取代或是由第一颗下一代气象卫星取代，仪器的观测能力及分辨率不断提高可大大增加可提供给气象用户界的资料量。

图1-4概述了除了目前运行的卫星之外，计划发射并于2016-2026年期间开始业务运行的气象卫星。新发射的卫星将与之前的卫星同时运行，直至达到使用年限后被逐渐淘汰。

图 1-4

计划于2016-2026年实现业务运行的WMO GOS气象卫星星座（状态：2016年6月）



Meteo-01-04

此外，一些研发型（R&D）卫星也包括一些具体的气旋或气候有效载荷，也可促进GOS。目前的研发卫星及其参数清单可查询：<http://www.wmo.int/pages/prog/sat/GOSresearch.html>。

研发卫星构成了GOS空间部分的最新组成。R&D航天飞行行为操作使用以及许多WMO支持的项目提供了宝贵的数据。R&D航天飞行中的设备或者提供了通常从在轨气象卫星上无法获得的数据，或者为现在正在使用的系统提供了改进。

1.2 其它WMO项目观测系统

1.2.1 WMO全球大气监测网

WMO全球大气监测网（GAW）综合了WMO在大气环境方面的一些研究和监测活动，包括WMO本底空间污染监测网和WMO全球臭氧观测系统，由20多个气象台和300多个区域站构成。GAW的主要目标是提供加强对大气运行方式和大气与海洋及生物圈相互作用了解所需的化学构成及相关物理特性方面的信息。其它GAW观测系统提供了太阳辐射观测、雷电探测和验潮仪测量。GAW是全球气候观测系统的大气化学部分。

1.2.2 全球气候观测系统

全球气候观测系统（GCOS）旨在提供用于监测气候系统、发现和定性气候变化，评估气候可变和变化的影响，支持改善气候系统理解，建模和预测，特别是气候变化研究等方面所需的深入观测。GCOS涉及物理、化学和生物属性以及大气、海洋、水、低温层和陆地进程等全部气候系统。

1.2.3 水文和水资源项目

该项目通过水文和气象站网络提供基础水文要素的测量。这些站收集、处理、存储并使用水文数据，包括地表水和地下水数量与质量方面的数据。该项目包括世界水文循环观测系统（WHYCOS），该系统基于参考站的全球网络并以近实时的方式发送水文和气象数据。

1.3 WMO综合全球观测系统（WIGOS）

WMO的成员国在其2007年大会上决定争取改进全球海洋观测系统（GOOS）、全球陆地观测系统（GTOS）和GCOS等WMO观测系统与WMO支持的观测系统的整合。WMO全球综合观测系统（WIGOS）概念将为所有WMO观测系统的操作和管理功能提供一个单一的中心点，并提供一个与WMO支持的观测系统互动的机制。综合将提高效率并降低成本。WIGOS的主要目标是：

- 增加系统之间的互操作性，并特别关注这些系统的空基和现有组成。
- 在一个广泛综合系统的可操作范围内，处理大气、水文、海洋学、低温层和陆地领域内的需求。
- 确保更广泛的管理框架并改善WMO的管理和治理。

第2章

卫星气象业务 (MetSat)

页码

2.1	卫星气象业务 (MetSat) 的定义和频率划分	10
2.1.1	MetSat卫星系统的一般概念	11
2.2	采用对地静止 (GSO) 卫星的MetSat系统	12
2.2.1	GSO MetSat原始图像传感器数据传输	12
2.2.2	GSO MetSat数据播发	13
2.2.3	GSO MetSat数据采集平台 (DCPs)	15
2.3	采用non-GSO卫星的气象卫星系统	16
2.3.1	Non-GSO气象卫星原始设备数据传输	16
2.3.2	Non-GSO气象卫星数据播发	17
2.3.3	非GSO气象卫星数据采集系统 (DCS)	18
2.4	备选的数据播发机制	19

2.1 卫星气象业务（MetSat）的定义和频率划分

《无线电规则》第1.52款将卫星气象业务（MetSat）定义为“用于气象目的的卫星地球探测业务”。它允许在地球站和一个或多个空间电台之间通过链路进行无线电通信操作，以提供：

- 通过人造卫星上有源或无源传感器获得的、与地球特性及其自然现象有关的信息（包括与环境状态相关的资料）。
- 从空基和地基平台上收集的信息。
- 向地球站播发的信息；
- 运行MetSat卫星及其应用所需的馈线链路。

与卫星气象业务应用有关的本章包括以下无线电通信传输：

- 向接收主站传输MetSat卫星的观测数据；
- 通过MetSat卫星向气象用户站重新传输预处理数据；
- 从MetSat卫星向气象用户站直接广播传输；
- 通过不是MetSat卫星的其他卫星系统向用户播发备选数据（GEONETCast）；
- 从资料收集平台向MetSat卫星传输。

表2-1显示了《ITU无线电规则》中分配给气象卫星（MetSat）服务和地球探测卫星服务（EESS）的频段。MetSat系统还有权使用分配给EESS的频段进行资料传输（请参见注解1）。

表 2-1

气象卫星用于数据传输的频段

可用于MetSat资料传输的分配	
空对地方向	地对空方向
137-138 MHz （MetSat主）	401-403 MHz （EESS和MetSat主）
400.15-401 MHz （MetSat主）	2 025-2 110 MHz （EESS主）（注解1）（以及空对空方向）
460-470 MHz （EESS和MetSat次 ³ ）	8 175-8 215 MHz （MetSat主）
1 670-1 710 MHz （MetSat主）	28.5-30.0 GHz （EESS次）（注解1）
2 200-2 290 MHz （EESS主）（注解1）（以及空对空方向）	40.0-40.5 GHz （EESS主）（注解1）
7 450-7 550 MHz （MetSat主，仅限于静止卫星）	
7 750-7 900 MHz （MetSat主，仅限于非静止卫星）	
8 025-8 400 MHz （EESS主）（注解1）	
18.0-18.3 GHz （在区域2空对地方向以MetSat为主，但仅限于静止卫星）	

³ 根据脚注RR.5.290，在一些国家MetSat服务是按主要地位分配的。

表 2-1 (完)

可用于MetSat资料传输的分配	
18.1-18.4 GHz (在区域1和区域3空对地方向以MetSat为主, 但仅限于静止卫星)	
25.5-27.0 GHz (EESS主) (注解1) (以及25.25-27.5 GHz的空对空方向)	
37.5-40.0 GHz (EESS次) (注解1)	
65.0-66.0 GHz (EESS主) (注解1)	

注解 1 – 由于MetSat是地球探测卫星服务 (EESS) 的子类, 所有这些分配 (例如8 025-8 400 MHz和25 500-27 000 MHz) 也可用于MetSat卫星的运行及其应用。

2.1.1 MetSat卫星系统的一般概念

MetSat系统一般通过可见光和红外成像仪以及采用划分给此类用途微波频率的无源和有源传感设备收集各种数据 (见第5章)。

由静止气象卫星星载设备收集的原始数据被永久发送到运营部门的一个地面主站, 进行处理并分发给各国气象中心, 官方档案馆和其他用户。原始数据包括在几个波长拍摄的地球图像, 以便提供各种测量数据。经过处理的数据或者发回给气象卫星, 以便通过低速率和/或高速率数字信号作为直接广播的一部分重新发给用户站, 或通过其它备选数据播发方法直接分发给用户。

与静止MetSat卫星不同, 在其地面站可永久性地看见该卫星, 非静止卫星上卫星所需的原始资料必须在卫星上收集和存储, 直至卫星经过此类地面站时将其传输至运行机构的主地面站。然后, 由运行机构对原始仪器资料进行加工, 并通过不同的资料分发机制提供给用户。为了改善数据的延迟, 仪器获取的资料子集将直接从卫星上进行“广播”, 并且当卫星处于任何位置的用户台站可见位置时, 由用户台站进行接收。这种服务被称为“直接读取”。

气象卫星 (静止和非静止) 也搭载了数据收集系统 (DCS) 及对地静止轨道 (GSO) 卫星和Argos等对地非静止轨道 (non-GSO) 卫星等系统中的数据收集平台 (DCP)。

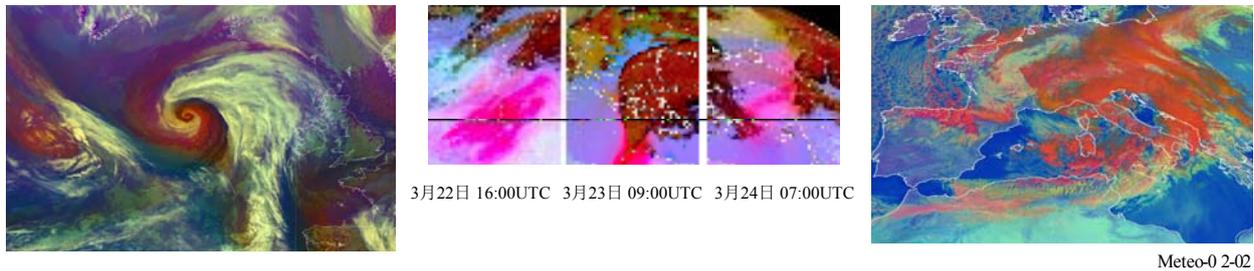
DCP通常位于地面、飞机、船舶和漂流浮标上, 向对地静止气象卫星传输资料。此类DCP收集到的资料是关于表面温度、风速、降雨量、水位、大气中气体以及在漂流浮标的情况下, 海洋污染物等参数。它们也可传输其现有位置, 以便判定其运动路线。除区域性DCP信道的操作外, MetSat的运营部门也通过国际频道的操作对国际数据收集系统 (IDCS) 做出贡献。作为一项额外的应用, 一些专门的IDCS信道也可划归应急/灾害监测系统使用。

Argos系统中的数据收集平台等向non-GSO MetSat卫星进行传输。当装置在浮标和浮桶上时, 这些平台测量气压、风速和方向、海面水流及其它海洋参数。在其它应用中, non-GSO卫星上的DCS系统也用来跟踪动物迁移并监控捕鱼船队。

图2-1显示了MetSat的一般架构。

图2-2

从GSO气象卫星获得数据经处理后的图像



北大西洋上的气旋风暴 (Meteosat-9 Airmass RGB, 19/05/08 12:00 UTC)

从北非移向希腊、土耳其、俄罗斯和哈萨克斯坦的严重沙尘暴 (Meteosat-9, Dust RGB, 22/03/08 - 24/03/08)

强劲的密史脱拉风和热那亚气旋, 在阿尔卑斯山南部带来强烈降水 (Meteosat-8 RGB: VIS0.8, IR3.9r, IR10.8, 20/03/07 09:00 UTC)

Meteo-0 2-02

这种类型的站全世界没有几个, 每个卫星系统有一至三个站点, 每个业务卫星有一个天线, 由GSO MetSat运行机构运行的主地面站总共有50-60个。它们装备了直径10至18米的天线并通常以3度的最小仰角进行操作。此类站的灵敏度 (G/T) 大约为23 dB/K。根据设备特性和采用的调制方法的不同, 目前GSO MetSat网络典型的发射带宽在2 MHz至20 MHz之间。

在此背景下, 应注意到, 对于2004年1月1日之后通知的指配对应的MetSat系统, 卫星移动业务 (MSS) 的应用将不保护1670-1675 MHz频段不受有害干扰的影响, 因此这一段不再适合新的MetSat系统使用。

对于目前正在开发或将于2016-2026年部署的下一代GSO MetSat系统见图1-4, 这些GSO MetSat系统的资料速率以及仪器资料下行链路的相关带宽要求将显著增加 (高达800 Mbit/s)。因此, 必须使用比1 670-1 698 MHz更高的频率, 诸如7 450-7 550 MHz (Electro-L和FY-4系列的原始数据传输)、8 025-8 400 MHz (GOES-R)、18.0-18.3 GHz (区域2)、18.1-18.4 GHz (区域1和区域3) (Himawari和FY-4系列), 以及特别是波段25.5-27 GHz (第三代Meteosat (MTG) 系列上的主资料收集 (MDA) 系统)。

2.2.2 GSO MetSat数据播发

以下2.2.2.1至2.2.2.6段描述了世界天气监测网全球观测系统框架内操作的GSO MetSat系统的直接播发功能。

2.2.2.1 展宽数字云图 (S-VISSR)

S-VISSR业务由中国“风云2号 (FY-2)”同步气象卫星系统系列的卫星操作。

由VISSR传感器观测到的数据传送到该气象卫星系统的主要操作地面站。在地面上, 数据以接近实时的方式进行预处理并已更低的 (展宽) 数据速率通过同一颗卫星进行再次传送。这些数据由称为中型数据使用站 (MDUS) 的S-VISSR地球站所接收。目前已知有一百多个这样的接收站正在使用中, 主要用户为气象部门和大学。

S-VISSR在1 683-1 690 MHz子频段内进行传输，其中心频率为1 687.5 MHz。在2 MHz带宽内，资料传输速率为660 kbit/s。接收站的灵敏度为12 dB/K，天线最小仰角为5度。

2.2.2.2 地球静止轨道环境业务卫星（GOES）变量（GVAR）

美国的地球静止轨道环境业务卫星（GOES-13、14和15）在位于西经75°和西经135°的GOES航天器叠加覆盖区内向至少数百个接收站传送称为GVAR、经过处理的测量数据。这些接收站不仅包括北美和南美的接收站，也包括新西兰、法国、西班牙和英国的多个地区。这些接收者绝大部分是参与气象研究或预报的大学和政府机构。其它用户还包括向商业用户提供天气预报的增值提供商。在1 685.7 MHz频率上以接近5 MHz带宽传输的数据流主要包括图像、附有校准和导航信息的探测数据以及遥测、报文和各种辅助产品。

随着新一代的GOES卫星从GOES-R开始，设在1 686.6 MHz频段上的GOES再广播（GRB）则取代了现有的GOES变量（GVAR）服务，同时需要增加带宽以适应更高的资料速率（30 Mbit/s，相比GVAR大约为2 Mbit/s）。目前在1 685.7 MHz上运行的GVAR需要4.22 MHz的带宽，而GRB将需要9.7或10.9MHz来传输已加工的资料并将在1 686.6 MHz频段内运行。

2.2.2.3 天气传真（WEFAX）

仍在一些GSO MetSat卫星上运行的其他模拟WEFAX业务被低速率信息传输（LRIT）业务在第二代气象卫星系统中取代。WEFAX业务包括向位于气象卫星接收区域内的低成本气象用户站的模拟传输。WEFAX业务参数由气象卫星协调组（CGMS）所定义并协商，该小组是交流对地静止和极轨气象卫星系统技术信息的论坛。

GOES-13、-14和 -15卫星上在1 691 MHz（586 kHz）频段上使用的天气传真（WEFAX）将与目前在1 692.7 MHz（27 kHz）频段运行的低速率信息传输（LRIT）和紧急情况管理者天气信息网络（EMWIN）整合成为单一的下行链路，被称为HRIT/EMWIN，其中HRIT替代LRIT。新的组合业务将在1 694.1 MHz上传输，需要1.21 MHz的带宽。1 676 MHz上的现有传感器数据下行链路将被移动到EESS X波段（8 025-8 400 MHz）内的8 220 MHz，以适合GOES-R航天器星载高级传感器大幅扩展的资料速率。

世界各地在世界气象组织（WMO）注册的WEFAX接收站有数千个。但是，到底使用了多少GVAR和S-VISSR接收机并不可知。对于小型和中型气象部门而言，WEFAX接收站是进行运营的重要设备，大学、环境机构、新闻机构、学校和其它部门也在使用WEFAX接收站。

WEFAX业务在其他子频段进行传输。剩下的WEFAX业务中心频率为1 691 MHz，带宽在0.03 MHz到0.26 MHz之间。典型的WEFAX接收站操作仰角大于3度并使用1.2米直径的天线，灵敏度（G/T）为2.5 dB/K。WEFAX传输的内容有卫星云图的各部分、图片表现的气象产品、测试图像和包含图像表现的字母与数字符号信息的管理讯信。

2.2.2.4 低速率信息传输（LRIT）

LRIT是2003年在GOES同步气象卫星上为向低成本用户站进行传输而启用的一项业务。该业务计划用于取代其它GSO气象卫星上的WEFAX业务，向类似的用户群体提供业务。

LRIT在1 690-1 698 MHz的子频段内进行传输，其中心频率在1 691 MHz附近，带宽为660 kHz。用户站天线直径在1.0米到1.8米之间，其操作的最小仰角为3度。取决于用户站的位置，LRUS的灵敏度为5-6 dB/K。LRIT已在多个MetSat系统上运行，即GOES卫星、Meteosat第二代卫星、COMS-1卫星（由GEO-KOMPSAT-2A卫星继续）、Himawari卫星、Electro-L卫星以及FY-2系列的FY-2E/F/G卫星，并将继续装载在FY-4系列，同时配备应急天气报警信息系统（EWAIB）。

2.2.2.5 高速率信息传输（HRIT）

随着第二代Meteosat系列卫星（Meteosat-8）的第一颗卫星投入使用，2004年1月引入了HRIT业务，目前在很多MetSat系统上运行，即Himawari卫星、COMS-1卫星（由GEO-KOMPSAT-2A卫星继续）、Electro-L卫星以及未来在FY-4系列上。此外，GOES-R上的GEOS系列卫星将继续HRIT/EMWIN服务。

HRIT业务工作在1 675-1 687 MHz、1 684-1 690 MHz或1 690-1 698 MHz子频段内。高速率用户站（HRUS）和MDUS的天线大小为4米或更小，最小仰角为3度。取决于用户站的位置，用户站的灵敏度为12-14 dB/K。

CGMS在2013年之前发布了一项新的全球直接广播规范（GEO HRIT/LRIT）。该直接广播规范适用于现有的和计划的GEO系统，但不能规定用户站特性。鉴于新提供和使用的电信和文件格式标准，CGMS将继续开展工作，以评估是否需要进一步更新GEO全球规范。

2.2.3 GSO MetSat数据采集平台（DCPs）

数据采集平台在气象卫星上工作，从遥控DCP收集气象和其它环境数据。每一个DCP在401-403 MHz频段内向气象卫星进行传输。DCP工作在时序模式中，传输时隙通常为1分钟，传输速率为100 bit/s。更高数据速率的DCP（300 bit/s和1 200 bit/s）在2003年开始投入使用，预计将在近期迅速增多。这些高速率DCP的带宽，在速率为300和1 200 bit/s时，分别是0.7510 kHz或2.2510 kHz。

存在着各种类型DCP发射机，定向天线时输出功率一般为5 W、10 W和20 W，全向天线时输出功率为40 W。由此产生的等效全向辐射功率（e.i.r.p.）在40-52 dBm之间。目前，数据采集系统工作在各种静止气象卫星系统中。

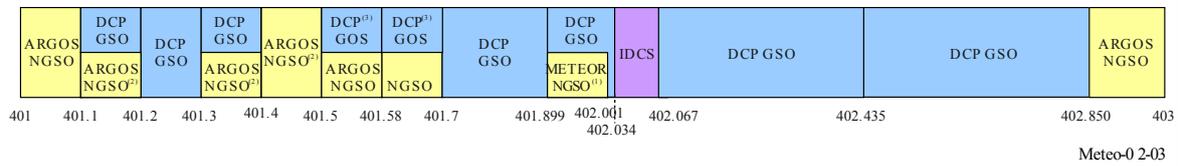
DCP向静止MetSat报告使用401.1-402.4 MHz范围内的频率，而402.001-402.067 MHz则用于国际用途（22个3 kHz带宽的信道）。通过采用窄带（小至0.75 kHz）和将报告时间缩短至10秒，有可能从大量的这类平台获取数据。如对于GOES-13、-14、-15卫星，2016年大约有27 000个GOES高速率DCP在运行，每天发送的讯息量高达400 000个，每天向GOS发送超过600万观测资料。预计这些数目还将进一步增长。

2.2.3.1 401-403 MHz频段的基本通用分区和共享条件

对静止和非静止、MetSat和EESS系统的DCS系统更高的频谱需求要求运行方遵守对当前和未来DCS系统（见图2-3）401-403MHz波段的基本通用分区，同时遵守建议ITU-R SA.2045中介绍的共享条件。

图 2-3

**401-403 MHz波段的基本通用分区，用于未来长期协调使用
静止和非静止MetSat及EESS系统上的DCS系统**



2.3 采用non-GSO卫星的气象卫星系统

除大量的同步气象卫星以外，non-GSO气象卫星系统也通过各种无源和有源传感器在可见光、红外和微波频谱观测到的全球覆盖测量数据对全球观测系统的卫星部分进行了补充。

世界多个国家和区域气象组织所运营的现有和未来卫星将保护从非同步轨道进行的连续和长期观测覆盖（见图1-3和1-4）。

图2-4为正在使用的non-GSO气象卫星系统中采用的先进甚高分辨率辐射计（AVHRR）获取云、海洋和陆地表面全球可见光、近红外和红外云图的样例。第5章提供了non-GSO气象系统中微波频谱的有源和无源传感器观测样例。

图 2-4

甚高分辨率先进辐射计图像的样例



Meteco-02-04

2.3.1 Non-GSO气象卫星原始设备数据传输

目前业务运行的非静止气象卫星（多数为极轨）的原始数据在7 750-7 900 MHz或8 025-8 400 MHz频段内（取决于所需的带宽）向位于高纬度的主站进行传输。当每一颗卫星经过其主站时，以突发方式进行传输，在其它时间发射机关闭。

2.3.1.1 使用25.5-27 GHz频段的非GSO MetSat原始仪器资料传输

一些未来的非GSO MetSat系统（例如EUMETSAT极地系统 – 第二代（EPS-SG）及其Metop-SG卫星和联合极地卫星系统（JPSS）的卫星）将需要使用比目前运行卫星（25.5-27 GHz频段）更高频

率的波段，以便能够向其主地面站传输高达800 Mbit/s的资料速率。此链接称为存储任务数据（SMD）下行链路。其他系统将使用8 025-8 400 MHz频段（例如，目前的FY-3、METEOR和Suomi-NPP）。

2.3.2 Non-GSO气象卫星数据播发

2.3.2.1至2.3.2.4段描述了在世界天气监测网全球监测系统的框架内操作的non-GSO气象卫星系统的直接播发功能。

2.3.2.1 使用1 698–1710 MHz频段的非GSO MetSat资料传输

2.3.2.1.1 自动图像传输（APT）

自动图像传输（APT）业务于20世纪60年代已经在一些航天器上开始引入并成为气象界向系统之间播发数据的最成功方式。世界各地仍有数千个APT接收站正在使用中。APT站成本很低，不仅是气象部门和大学在使用，许多非气象用户也在使用。

APT站通常包括全向天线和商用成品（COTS）VHF接收机。前端附有低成本图像处理系统，使用通用的台式计算机运行低价格软件。APT在NOAA卫星和METEOR-M N2系列卫星上运行。

2.3.2.1.2 低分辨率图像传输（LRPT）

LRPT业务应该取代大部分non-GSO气象卫星系统中的APT应用。然而，LRPT服务唯一实施和业务运行的卫星系列是METEOR-M N2。LRPT基于数字传输方式并使用目前APT使用的相关频段，其带宽也可达到175 kHz。

2.3.2.1.3 高分辨率图像传输（HRPT）

HRPT业务为气象界提供高分辨率云图。HRPT发射机持续开机并可由任何一个用户站接收。世界各地在WMO注册的HRPT接收站有数百个。但是，应注意到该数目并不全面，因为这些站的注册并不是强制的。HRPT数据对于气象业务的操作至关重要并在其它领域也有着广泛的作用。

在像NOAA卫星上的HRPT服务中（1 698/1 702.5/1 707 MHz）在1 698-1 710 MHz频段内进行传输，信号带宽在2.7 MHz到4.5 MHz之间。用户备有跟踪抛物面天线，直径通常为2.4米到3米之间。推荐用于接收的最小仰角为5度，但有一些站工作的仰角小于该值。这些站的灵敏度为5 dB/K。也有另外一些HRPT系统工作的数据速率为原始HRPT系统的两倍左右。

在最新的一些业务气象卫星（即METEOR-M N2系列（1 700/1 705 MHz）、Metop（1 701.3/1 707 MHz）和FY-3（1 701.3 MHz、1 704.5 MHz或1 706.7MHz））上还有一种先进HRPT（AHRPT）应用，该应用旨在取代HRPT服务。AHRPT传输与其它HRPT系统使用同一频段。其带宽为4.5至6.8 MHz之间。AHRPT接收站的最小仰角为5°，天线为抛物面天线，典型直径为2.4米到3米之间。AHRPT站的G/T值约为6.5 dB/K。

在气象卫星协调组（CGMS）的框架下，CGMS在2014年之前发布了一项新的全球直接广播规范（LEO直接读取（HRPT / AHRPT））。直接广播规范适用于现有的和计划的LEO系统，但不能规定用户站特性。鉴于新提供和使用的电信和文件格式标准，CGMS将继续开展工作，以评估是否需要进一步更新LEO全球规范。

2.3.2.2 使用7 750-7 900 MHz频段的非GSO MetSat资料传输

资料的数量更多和分辨率更高的趋势还要求使用更高的频带，将仪器资料直接分发给用户站，因为1 698-1 710 MHz波段不能满足此类高分辨率资料对相应带宽的要求。因此，以空对地方向分配给MetSat必须使用的下一个更高可用频带是7 750-7 900MHz。在这个频带中，新一代非GSO MetSat系统的带宽要求对于不同下行链路（MPT (FY-3)、高分辨率资料（HRD）（Suomi-NPP和JPSS）和直接资料广播（DDB）（Metop-SG））而言是从30至150 MHz，并可以满足。

中等分辨率图像传输（MPT）可提供一整套FY-3卫星系列星载MERSI仪器测量的资料。当前FY-S卫星资料传输速率在45 MHz带宽内为18.7 Mbit/s，中心位于7 775 MHz，或是资料传输速率在60 MHz带宽内为45 Mbit/s，中心位于7 780或7 820 MHz。此外，FY-3系列中的延迟图像传输（DPT）服务可用于在8 145.95 MHz内进行转储数据传输，其带宽为149 MHz，资料速率为93 Mbit/s，或是8 175 MHz和8 125 MHz，其带宽为300 MHz，资料速率为225 Mbit/s。高速率资料（HRD）是广播Suomi-NPP和JPSS卫星系列的全分辨率资料集，其资料速率高达15 Mbit/s（30 MHz带宽），其中心频率为7 812 MHz。Metop第二代卫星系列（Metop-SG）的直接资料广播（DDB）将在7 825 MHz上进行广播，其带宽为150 MHz。

2.3.3 非GSO气象卫星数据采集系统（DCS）

non-CSO气象卫星上的数据采集系统提供了一系列由政府机构和商业实体使用的信息。

这样的数据包括与物理、化学和生物学进程有关的海洋、河流、湖泊、陆地和大气环境参数。它也包括动物跟踪数据。商业实体的利用是有限的。例如，它包括监控石油管道的状况以便保护环境。还部署了一些发射机，以报告紧急情况并提供危险/灾害发现等数据。从对地非静止气象卫星上操作的数据采集系统的样例包括Argos和巴西的DCS。Argos第三代（Argos 3）已在Metop系列卫星、NOAA-19和一颗SARAL卫星上运行。

NOAA、Metop和SARAL卫星在850 km的高度上沿着极地轨道运行：每运行一圈都要经过南北极。轨道平面以相同的速度在比地球绕太阳转动更高的极轴上转向。每个卫星可一直并同时观测到直径约为5000公里内的所有信标。随着卫星的运动，这个圈子的地面轨迹形成了一个环绕地球的5000公里宽带，并且通过北极和南极。

目前，Argos系统工作在401.579-401.690 MHz频段，尽管存在数千个平台（称为平台发射机终端），每一个平台仅要求几个kHz的带宽。利用其极轨卫星轨道的特性，可以容纳许多Argos平台。正在运行的平台约22 000个。每个平台都有一个唯一的识别码，这取决于其传输电子设备。

每条消息的持续时间少于1秒。Argos 3系统引入了新的数据采集业务，提供高速率（4 800 bit/s）和平台询问功能。根据比特率，平台输出功率的值为从-3 dBW到7 dBW。

卫星利用460-470 MHz频段对称为平台讯息收发信机（PMT）的平台进行询问，目前在465.9 MHz频率上运行。

例如其他频带，Argos系统第四代（Argos-4）的系统容量和带宽预计将大大增加，见图2-3。此外，新的Argos 4系统将使用464.98775 466.98775 MHz频带内的下行链路，将实施扩频多址接入，以免对陆地用户造成干扰。

巴西的DCS基于SCD（25°倾斜轨道）和CBERS卫星，这两颗卫星利用401.605-401.665 MHz频段进行数据采集平台的接收。由于巴西DCS与Argos系统和其它互补轨道卫星之间的兼容性问题，自2001年起已实施两个系统之间的数据交换。

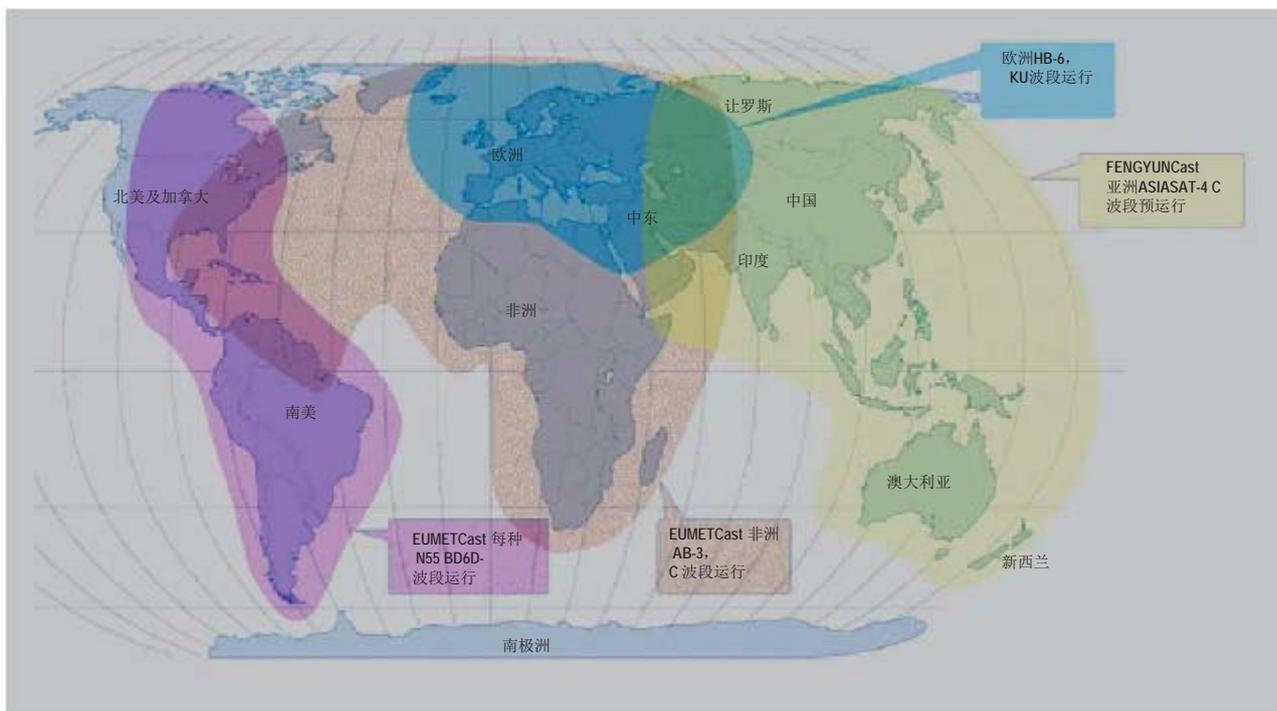
2.4 备选的数据播发机制

除传统的GSO和non-GSO气象卫星系统机制外，正在发展另外一种播发系统，称为全球地球观测数据共享系统（GEONETCast）（见图2-5）。该系统是一种利用现有商业通信基础设施，开发一个全球、可操作的端到端地球观测数据采集和播发系统的主要地球综合观测系统（GEOSS）举措。GEONETCast的概念是利用通信卫星的全球网络的组播功能从提供者向用户发送环境卫星和实测数据与产品。为了实现这个目标，基于数字化视频广播（DVB）技术，若干个区域中心负责建立和维护基于卫星的区域分发中心，并可向普通用户群提供补充服务。当前的合作伙伴包括中国气象局（CMA）、国家海洋和大气管理局（NOAA）、世界气象组织（WMO）和EUMETSAT以及许多潜在的数据提供方合作伙伴。

通过整合CMACast系统，可实现全球覆盖，包括覆盖亚太地区，GEONETCast美洲组成部分可覆盖美洲，而EUMETCast系统可覆盖欧洲、非洲和美洲。

图2-5

GEONETCast全球覆盖



第3章

气象辅助业务

页码

3.1	引言.....	22
3.1.1	划分的无线电频段.....	22
3.1.2	气象辅助业务的气象功能.....	23
3.2	气象辅助传感系统的示例.....	24
3.2.1	无线电探空仪.....	24
3.2.2	下投式探空仪.....	26
3.2.3	气象火箭探空仪.....	27
3.3	影响气象辅助系统特性的因素.....	28
3.3.1	地基接收机天线系统.....	28
3.3.2	地基处理系统.....	30
3.3.3	一次性传感包.....	30
3.4	气象辅助业务所需气象观测的特性.....	31
3.5	各国在气象辅助业务操作中差异的原因.....	34
3.5.1	可用技术的差异.....	34
3.5.2	高空风气候学的差异.....	34
3.5.3	网络密度的差异.....	35
3.5.4	401-406 MHz频段的使用.....	35
3.5.5	1668.4-1 700 MHz频段的使用.....	36
3.5.6	保留两个频段的要求.....	36
3.6	未来趋势.....	36

3.1 引言

《无线电规则》（RR）第1.50款将气象辅助（MetAids）业务定义为用于水文、观测和研究等气象用途的无线电通信业务。本章仅涵盖高空实地观测，其它气象辅助应用详见本《手册》第6章。

在实践中，气象辅助业务通常提供收集气象参数的现场传感系统与远离的机站之间的链路。现场传感系统可由气象气球携带。或者，它也可由从飞机或气象火箭展开后穿越大气层。基站可位于一个固定地点，或像在军事行动中那样，放置在移动平台上。基站由船舶以及飓风观测或研究飞机携带。根据WMO制定的全球固定日程安排（00、06、12和18 UTC），绝大多数此类实地测定系统为无线电探空仪，其中多数是从固定地点和少量商船定期施放，从而组成了WMO GOS全球高空网。

3.1.1 划分的无线电频段

用于气象辅助业务的无线电频段（除那些国家脚注所规范的以外）见表3-1²。

表 3-1

用于气象辅助系统和应用的频段

频段
400.15-401 MHz
401-402 MHz
402-403 MHz
403-406 MHz
1 668.4-1 670 MHz
1 670-1 675 MHz
1 675-1 690 MHz
1 690-1 700 MHz
35.2-36 GHz

对气象辅助业务具有严重制约的这些频段中还有其它主要业务。对其它业务的划分严重限制了气象辅助业务。由于绝大多数气象辅助系统的传输功率低且链路相对较长，其它业务和气象辅助业务同信道的共用很少能够实现。在国际层面上通过世界气象组织的协助可与其它气象系统，或者在国家层面上可与非气象系统形成此种共用。

世界气象组织定期更新在WMO网络内使用的无线电探空仪的目录（WMO No.9，卷A，现由OSCAR/地面WIGOS元数据库所取代），以便使用这些测量的气象人士可以确定每一个站所使用无线电探空仪的类型。该目录包括了所使用频段的记录。

² 对于这些频段内的现有频率划分，请读者参考《无线电规则》第5条。

气象辅助业务的用户还有：

- 环保部门；
- 大学和气象研究组织；
- 军事部门。

这些额外的系统通常在国家气象部门日常运营以外进行独立操作，未列入WMO目录。许多非WMO气象辅助系统设置在移动平台上并可能在操作使用过程中，部署在各种位置。出售给这些独立组织的无线电探空仪的数量与WMO日常网络中采用的数量相似。通常，这些额外系统的操作不受国家无线电管理部门的管辖。

在一些国家，通过采用一个详细的信道（划分）方案，来避免不同组织的无线电探空仪操作部门之间的同信道共享。但是，在许多国家，仍在采用务实的频谱使用方法。在发射无线电探空仪之前，无线电探空仪系统操作部门利用基站接收机扫描可用的气象辅助频谱，由此确定在发射地附近是否已有在用的无线电探空仪。然后选择将要发射的无线电探空仪的频率（在发射前根据需要进行调谐），以便其工作时不影响早已升空的其它系统。一个国家气象辅助业务可用的气象辅助频谱通常是《无线电规则》所划分频段的一个子频段，因为如前面所述，与其它无线电通信业务达成了国内共用协议。

WMO网络中可供商用的无线电探空仪系统在400.15-406 MHz和1 668.4-1 700 MHz频段内进行操作。一旦详细讨论了在用的系统之后，要在这两个气象辅助业务频段内继续使用的原因将在下一节中讨论。

3.1.2 气象辅助业务的气象功能

对于业务气象而言，对大气温度、气压、相对湿度、风速和风向变化的准确测量非常重要。这些测量确定了天气系统的基本特性，天气预报人员可以判断短期内可能会发生的变化。它们也提供了用于长期预报的数值天气预测模型的输入参数。它们可进一步用于气候监测用途。短期预报要求温度和相对湿度测量具有很高的垂直分辨率。例如，接近地表的云的位置需要在垂直方向上小于100米的精度进行测量。

许多年来，气象辅助业务是高垂直分辨率大气测量的主要来源。此外，这些实地测量对于校准星载遥感至关重要，尤其对于被动遥感。气象辅助在现场从地表之上的位置向由接收机和数据处理系统构成的基站传送大气气象变化的测量结果。在绝大多数情况下，测量压力（或高度）、温度、相对湿度、风速和风向。也可能包括臭氧、悬浮微粒或放射物等大气成分的测量。基站的输出被传送给气象通信网络，以便与其它接收站的数据进行综合。通常气象辅助在使用后不进行回收，所以发射机和传感包的成本必须保持在最低水平。

在最常见的气象辅助系统中，气象气球可将工作的无线电探空仪带至距地面36公里的高度，而后气球爆裂。在某种程度上，开展必要常规观测的高度因用途和地理位置而各异，而对于许多国家而言，这又受限于气球的成本和所需的浮升气体。在许多国家，日常气象操作的目标高度约为距地面25公里，但是一些台站需要测量30公里以上的高度。全球范围内的预报需要考虑大气在高空的运动，但其详细程度要低于接近地表的条件。但是，长期气候观测和相关的科学研究需要从尽可能高的高空大气进行高分辨率测量。

无线电探空仪测量结果最多向位于气球升空地点的基站传送两个小时。在此期间，地球随高空大气的风进行移动，在某些情况下，在上升过程中可能漂离发射地点250公里以上。在下降过程中，它们可能再漂移150公里。下降数据也可被视为位势值。由于现有电池所受的各种限制，传输功率总是很低。电池必须在飞行过程中碰到的极低温度下正常工作，且在气球破裂坠地时不得破坏环境或危及公众安全。

在WMO GOS网络中，每天要发射1400多个无线电探空仪。这些无线电探空仪中，至少有400个是用于在指定全球气候观测系统（GCOS）站址的测量。每一个工作的无线电探空仪所获的信息立即被各国气象部门用于支持本地预报。世界各地的数值天气预报也需要这些信息，其目标是在三小时内向世界各地气象部门传播完整的信息报告（以标准气象代码的格式）。这些信息也被永久性地归档并随后用于一系列科学研究。目前部署的、数量更为有限的其它气象辅助业务系统包括：

类型	描述
探空仪	利用降落伞从高空飞行的飞机上投放，通常下投式探空仪向飞机上的接收站回传半小时左右的数据
系留探空仪	通常在大气边界层范围内连续地从系留气球回传数据
气象火箭探空仪	在多至95公里的高度为专门科学研究传送大气测量数据或从船舶发射，来进行低层测量
小型无导航飞机 (遥控飞行器 (RPV) 或无人驾驶飞行器 (UAV))	携带与无线电探空仪类似的传感装置，到海洋偏远地区并以标准气象信息的方式回传资料

除了业务GOS之外，防护和研究用途气象辅助可用于天气侦察，以减缓自然灾害和工业灾害。

执行无线电探空仪测量的现有成本限制了业务无线电探空仪网络的最佳间隔在水平方向上不能超过250公里。该间隔考虑了气球的漂移，因此可在气象辅助业务所需无线电频谱的网络研究中作为标准。但是，有组织的天气系统持续特性的足够分辨率要求水平方向的测量间隔为50公里或更少。气象研究要求无线电探空仪或下投式探空仪以这种间隔进行测量。未来，频率划分需要满足业务型无线电探空仪和用于研究界的无线电探空仪的使用要求。

尽管GOS网络中有源业务型无线电探空仪站的数量随着时间的缓慢减少，用于环境和军事行动的无线电探空仪却在增加。此外，国家气象部门要求在海洋上指定区域进行更多的现场测量。可以预计，在未来的十年内，新型气象辅助系统的使用将显著增加，以支持这些发展的要求。

3.2 气象辅助传感系统的示例

3.2.1 无线电探空仪

全世界每年要执行800000次以上的无线电探空仪飞行任务（图3-1和3-2）。此外，还有用于各种其它应用的400000次飞行。通常，用来发射无线电探空仪的基站站址配备了专门的设备，以便在各种天气状况下发射气球。最关键的站址配备了应急动力电源和食宿设施，以便在当地基础设施被极端天气或工业事故等其它情况毁坏时，仍可以继续测量。

图3-1

无线电探空仪飞行装置



Meteo-03-01

图3-2

无线电探空仪



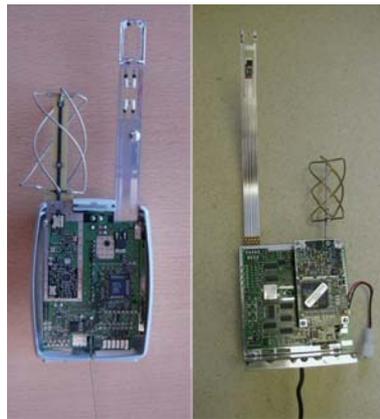
Meteo-03-02

典型的无线电探空仪包括以下几个主要的部件：发射机、电池、传感器包、以及很多时候一个辅助导航（NAVAID/ GNSS（例如GPS）接收机（图3-3）。发射机将数据传送给接收站。典型的无线电探空仪使用可耐受 -90°C 气温的锂电池或碱性电池。传感器包包括测量温度、压力、湿度，以及在特殊情况下臭氧或电离辐射等大气状况的传感器。传感器包也将传感器数据压缩到足以传回地面站的长度。

无线电探空仪系统是通过跟踪其气球在大气中的移动来测量风。主动跟踪系统采用一次（跟踪气球下面悬挂的雷达信号反射器）或二次（跟踪无线电探空仪中的应答器）雷达跟踪。被动跟踪系统采用NAVAID/GNSS接收机，或在某些海岸地区采用装载的LORAN-C中继发射机，并将该数据传送到地面站，或采用无线电经纬仪跟踪无线电探空仪信号。

图3-3

现代化无线电探空仪电子设备

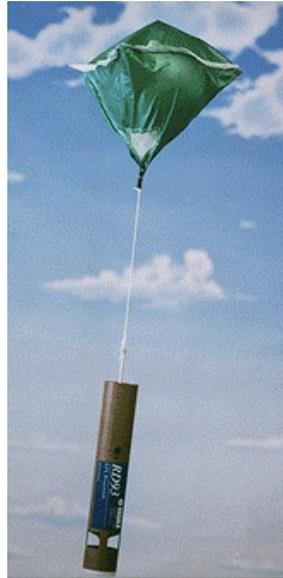


Meteo-03 -03

3.2.2 下投式探空仪

下投式探空仪的组成部分与无线电探空仪类似，但组装后可从飞机上投放，在随着降落伞下降的过程中测量大气分布，参见图3-4。因为在飞机上不可能进行大型追踪天线的操作，所有下投式探空仪都工作在401-406 MHz频段并在风测量中使用NAVAID/GNSS。在操作中，下投式探空仪在空间和时间密度上的部署都要高于无线电探空仪。它们主要用于跟踪海上热带风暴并做出剖面图。在同一时间，飞行和跟踪的下投式探空仪可能多达16个。高密度的部署使得采用与无线电探空仪网络中密度更高部分中类似的高度稳定窄带发射机成为必要。下投式探空仪也可用于探测偏远海洋地区（或者陆地）的天气现象或基本大气状况。

图3-4
下投式探空仪



Meteo-03 -04

3.2.3 气象火箭探空仪

气象火箭探空仪是一种更为专业的气象辅助系统。如同下投式探空仪一样，它们通过火箭施放到高空，然后在降落伞控制的下降过程中进行大气分布曲线的测量。气象火箭探空仪可能包含与无线电探空仪相同的基本组成部分，但用于高空测量的传感包可能与用于大气低层的那些系统不同。与下投式探空仪不同，他们在风测量中可能采用无线电定向或NAVAID/GPS。绝大部分气象火箭探空仪被发射到很高的高度，且通常被用来支持空间发射行动（图3-5）。由于气象火箭探空仪的部署成本较高，有必要采用更高质量的发射机。

图3-5

气象火箭探空仪



Meteo-03 -05

3.3 影响气象辅助系统特性的因素

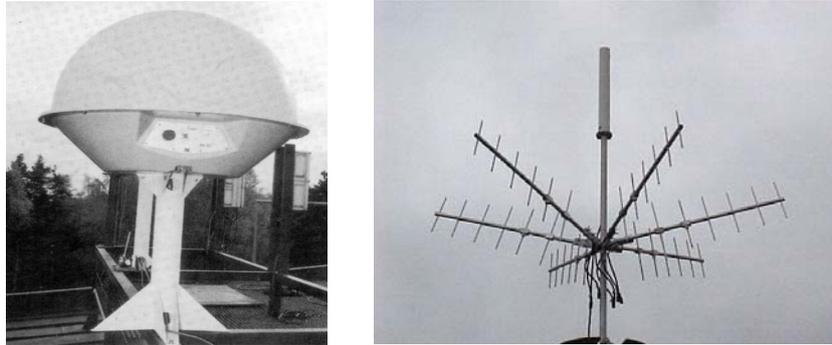
气象辅助系统由几个基本无线电通信组件构成。系统的地面部分通常包含一个天线/接收机系统和一个信号处理系统。ITU-R RS.1165建议书《气象辅助业务中无线电探空仪系统的技术特性和性能标准》包含了用于气象辅助操作的各种系统的描述和技术参数。

3.3.1 地基接收机天线系统

无线电探空仪、下投式探空仪和气象火箭探空仪采用无线电频率电路向位于数据处理位置的天线/接收机系统回传数据。该种用途使用最多的两个频段是400.15-406 MHz和1 668.4-1 700 MHz。通常，天线/接收机系统位于地面（对于无线电探空仪和气象火箭探空仪而言），但在下投式探空仪的情况下，天线/接收机系统位于飞机之上。具体的天线接收机系统配置根据工作频段和预期的最大飞行侧重范围的不同而变化。对于工作在400.15-406 MHz频段内的系统，通常采用全向天线和八木天线或小型反射器（图3-6）。这些种类的天线位置射频链路不需要很高的天线增益。在该频段内，测量风不需要采用无线电测向（RDF）400.15-406 MHz频段内工作的天线系统的天线增益范围为0 dBi到10 dBi。

图3-6

全向天线和定向系统 (401-406 MHz)



Meteo-03-06

风测量一般通过1 668.4-1 700 MHz频段内的RDF或雷达跟踪完成。一些国家仍然首选使用RDF来跟踪有内置NAVAID/GNSS接收器进行高空测风的无线电探空仪- 这可成为使用以RDF测风的无内置NAVAID/GNSS接收器无线电探空仪的备选方法。因此，采用装备有大型抛物面天线或相控阵面板的跟踪基座来避免路径损耗（图3-7）。天线基座根据方位角和仰角来旋转天线，以跟踪气象辅助运动。工作在1 668.4-1 700 MHz频段内的天线系统常见的天线增益为25-28 dBi。

图3-7

跟踪天线系统 (1 668.4-1 700 MHz)



Meteo-03-07

3.3.2 地基处理系统

接收机将基带无线电探空仪信号传递给信号处理系统，该系统对模拟或数字无线电探空仪数据进行解码并生成包括风在内的所需大气测量数据。有些气象辅助业务并不向接收站传送实际的气象数值（气压、温度、湿度、臭氧、风等），而是传送传感器的电子特性和NAVAID/GNSS数据，以将气象辅助的处理成本降至最低。然后，地面信号处理系统将电容和/或电阻传感器数值以及传感器校准数值代入多项式，以计算气象参数。其它气象辅助可在其内部完成大部分信号处理，并直接传送实际气象数值和风。在这种情况下，地面处理系统或仅可进行总体数据处理的一部分。

3.3.3 一次性传感包

气象辅助业务操作的特性限制了其设备的生产方式。绝大多数设计限制影响了一次性气象辅助设备的无线电频率特性并由此影响到气象辅助操作的频谱要求。最重要的限制是设备的生产成本。但是，密度、数量、工作环境和功率效率等其他限制也是生产厂商和运营部门的主要关注。

在实施频谱更加有效的发射机的讨论中，生产成本通常是提出的第一个问题。无线电探空仪是一次性设备。通常，无线电探空仪飞行一次后即丢失，尽管一小部分也被回收并经修理后重新使用。有必要尽量减小电路的复杂性，以将成本降至最低程度。技术进步已为采用更具成本效益的集成电路来改善无线电探空仪性能提供了一些机遇。历史上，许多无线电探空仪的改进是提高传感器的测量精确度。近年来，运营部门被迫对射频特性进行一些改进，以便增加网络密度。这导致大部分世界主要制造厂商的无线电探空仪设计在发射带宽和边带辐射方面要符合十分严格的ETSI标准。许多基本无线电探空仪设计包含单级发射机。这些设计受工作过程中温度、电池电压变化以及天线电容性负载等因素的影响。采用商用专用集成电路（ASIC）正在增多，因为可在极端温度范围内工作的适当设备变得越来越普及。

出于安全原因，气象辅助业务一次性设备的密度必须加以限制。出于安全和操作的原因，气象辅助业务一次性设备的数量也必须受到限制。尽管发生的可能性很小，MetAids的设计必须确保与飞机的碰撞不会损坏飞机且不会造成危及生命安全的状况。如果设备被吸入引擎，那么密度问题就令人关注了。设备的质量是一个应该关注的问题，因为MetAids一次性设备在飞行后还要落地地球表面。降落伞通常用来控制下降的速度。但是，一个具备相当质量的物体有可能造成损毁。绝大多数MetAids一次性设备现在的质量远远小于1公斤（不含气球）。通常，无线电探空仪放置在重量轻且易损毁的泡沫、纸盒或塑料包装中。电路板体积较小，且只包含少量的部件，电路设计采用了最大功率效率。由于密度和质量限制，不能采用大型的电池来为设备提供动力。

MetAids在飞行中可能会暴露于各种最恶劣的条件。温度变化范围为50°C至-90°C，湿度可从非常干燥的条件变成冷凝、凝华或降水。在高空，即使空气的温度很低，为电子设备通风散热的空气不足和太阳辐射可能会导致设备过热。这些极端的状态变化可对包括发射机在内的所有设备部件的性能和特性产生重大的影响。由于极端的温度变化和导致电容性负载的天线结冰等其他因素，设计较老的无线电探空仪发射机漂移5 MHz或更多就不足为怪了。由于功率消耗的限制和发热对传感器性能的影响，电子设备的严格温度控制并不现实。此外，人们发现无线通信行业所使用的商用发射机集成电路在极低温度下并不能工作。

气象辅助电子设备的功率消耗必须在设计中小心控制。大型电池增加了重量，有可能引发危及安全的灾难，而且额外的重量要求采用更大的气球和在气球充气过程中需要更多的气体，因而增加了运营成本。功率效率是设计气象辅助设备时采用尽可能低的发射机输出功率但仍维持可靠的遥测链路的主要原因。无线电探空仪发射机通常产生100-400 mW的功率且最大范围的链路预算也只有0.5-2 dB的链路余量。广泛采用的单级发射机被视为具备非常高效率的功率，而更高级的发射机设计需要消耗比单级发射机多150-250%的动力。但是，这些单级发射机亦受到极端温度变化和工作过程中天线电容性负载的影响，产生很大的频率偏移。为此，具备更高频谱效率的发射机设计既影响到发射机生产成本，也影响到相关电子设备的成本。

3.4 气象辅助业务所需气象观测的特性

本节介绍了气象辅助业务操作所需观测的特性，并附有几个无线电探空仪测量的例子。

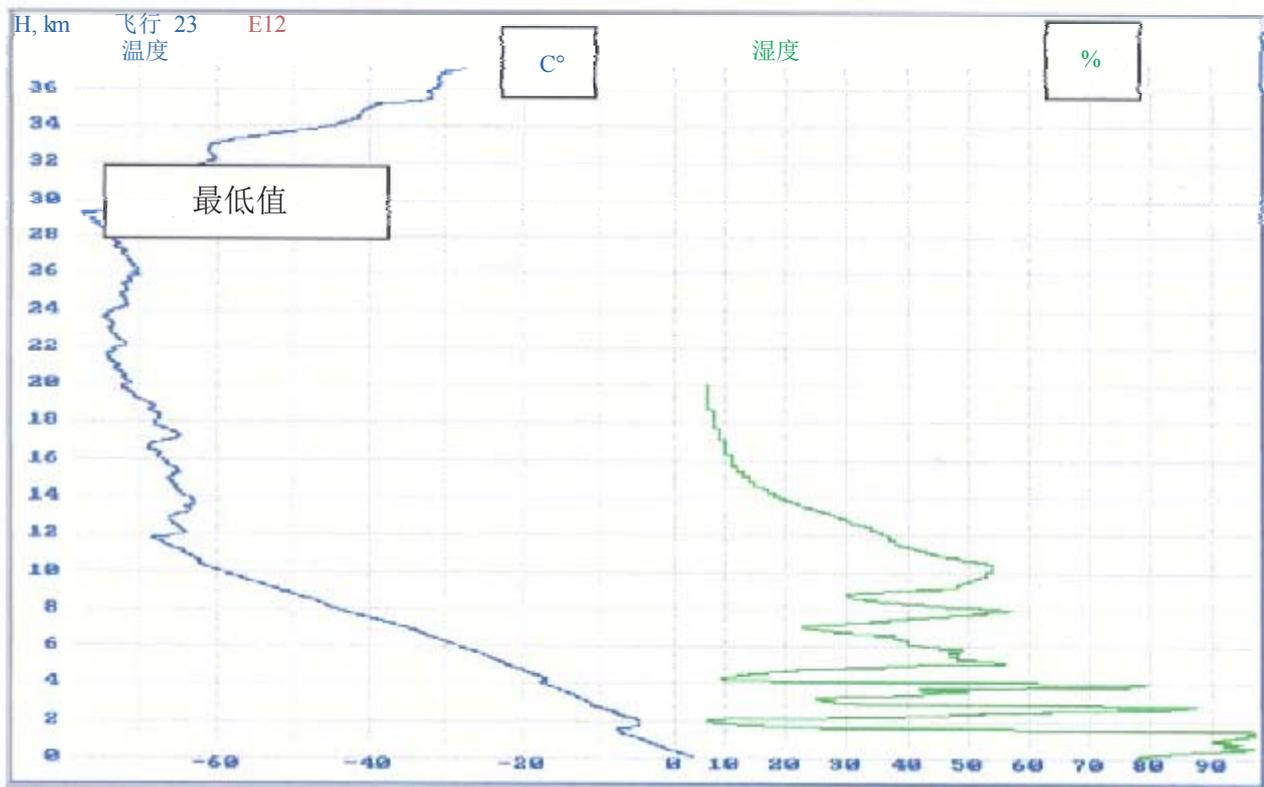
图3-8显示了在英国位于北纬60°的一个气候观测站进行的测量中，作为高度函数的温度和相对湿度测量情况（设得兰群岛，Lerwick，2000年1月23日）。无线电探空仪温度测量有一些细小误差，在28公里以下小于0.5°C，非常适合气候观测。在该观测中，从地表至12公里的高度，温度以相对统一的速度下降。该高度被气象学家定为对流顶层，它代表了与地表相互作用的空气和平流层空气之间的界限。在平流层，与表面层的相互作用极少。在对流顶层的表面和顶部之间，有一些相对较薄的层，在此温度或者随高度稍稍增加，或者缓慢下降。当气象辅助设备穿过这些层上升时，相对湿度也快速下降。下降最明显的地方发生在这些层1.8公里和4公里的高度，预报人员将此称之为“逆温”。此外，在接近8公里和10.3公里的地方，温度递减率也有不太明显的变化，并伴有相对湿度随高度明显下降的情况。温度和湿度在垂直方向上变化速率的变动影响了大气中无线电波的传播。由此，气象辅助观测也适合于确定无线电传播条件。

提升无线电探空仪的气球设计用来在以300米/秒的速度上升时提供最优性能。在上升中任何过早的显著接收损耗（即使是10秒）都是不需要的，因为这危及了无线电探空仪解析局地预报所需的近地面温度和相对湿度变化的能力。丢失四到五分钟（即使仅仅是由于受到了风测量的错误导航信号）往往需要发射第二个无线电探空仪，来满足工作要求。

图3-8所示的观测属于典型情况，因为相对湿度测量值是来自地表与温度下降到-40°C以下的高度之间的5%到90%。当温度在10公里处下降到-60°C时，相对湿度传感器的反应太慢，无法完全解析相对湿度的快速变化。这反映了二十世纪80年代以来无线电探空仪相对湿度传感器性能的一个显著改进。所有早期的湿度传感器在-30°C和-40°C之间已经变得不可靠。相对湿度传感器最难于制造，已被证明是在对设计生产设施进行大量长期投资之前，设计和生产无线电探空仪的主要障碍之一。

图3-8

无线电探空仪的温度和湿度测量



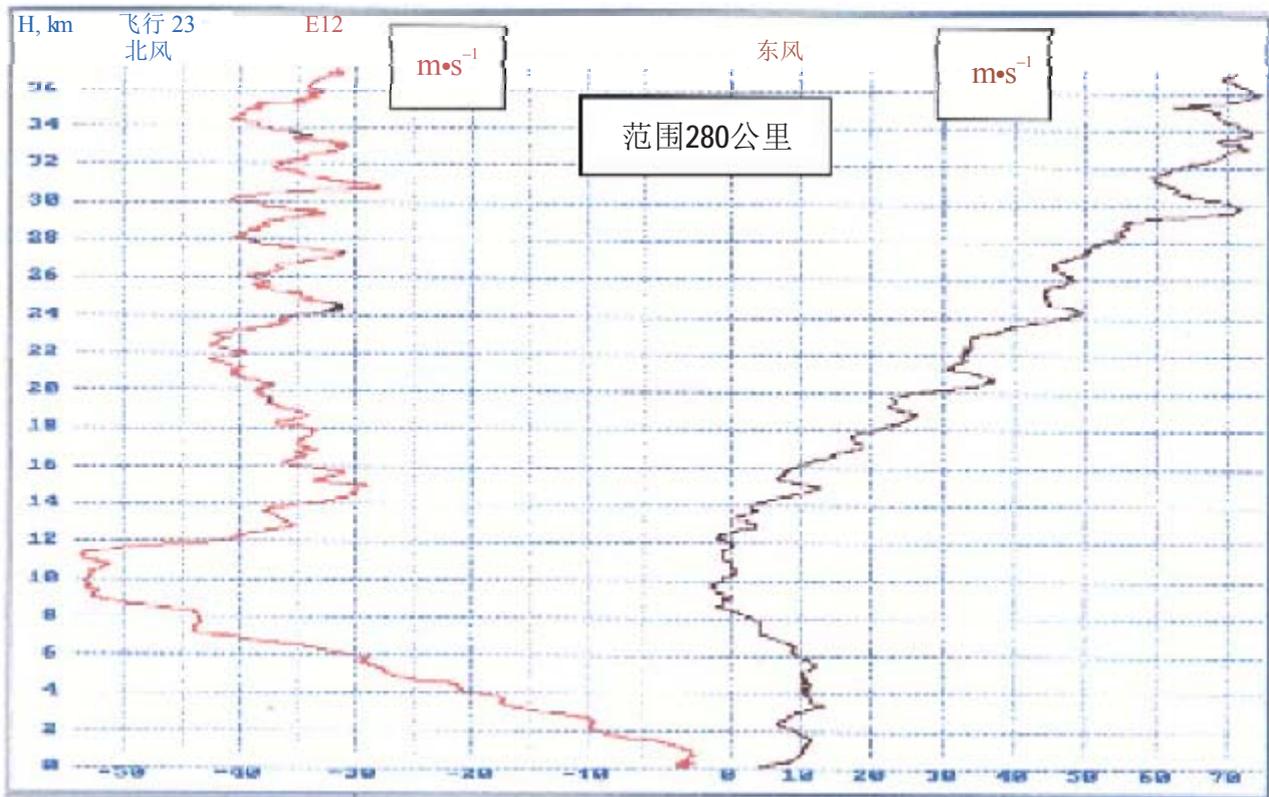
Meteo-03-08

由于传感器技术的限制，湿度测量只能在20公里以下的高度进行。图3-8中最小温度发生在29公里处³。29公里以上这个温度显著的增加是由于北半球冬季高空大气运动造成的明显升温。

图3-9显示了对图3-8所示的同一无线电探空仪飞行位置（于2000年1月23日从设得兰群岛Lerwick发射）进行跟踪后得到的风测量结果。通过无线电探空仪所接收的Loran-C导航信号计算无线电探空仪的运动并随后回传给基站。两个近距离正交的组成部分中的每一个的精确度预计为0.5毫秒左右。当位于最远距离且向基站的回传不是最优时，精确度降低至1.5毫秒左右。在南北方向，最强的风发生在10公里和12公里的高度，在图3-8中10公里温度不连续处附近为中心出现了射流。在该日，东西组成部分在射流最大处附近比较微弱，但该部分的强度在14至30公里的上部高度均匀地增加。风速的增加是14公里至30公里范围内所有高度从南到北始终如一的温度梯度所作用的结果。在极地涡旋中心附近，北方的空气更加寒冷。航空运输和军事部门的高空风测量数值较高。如图3-9那样的气象辅助观测结果往往在基站被转变成一种特殊的军事编码并传送给相关操作单位。

³ 在该点温度已降低至接近启动北半球冬季破坏臭氧的化学机制所需的那些条件。

图3-9
无线电探空仪的风测量

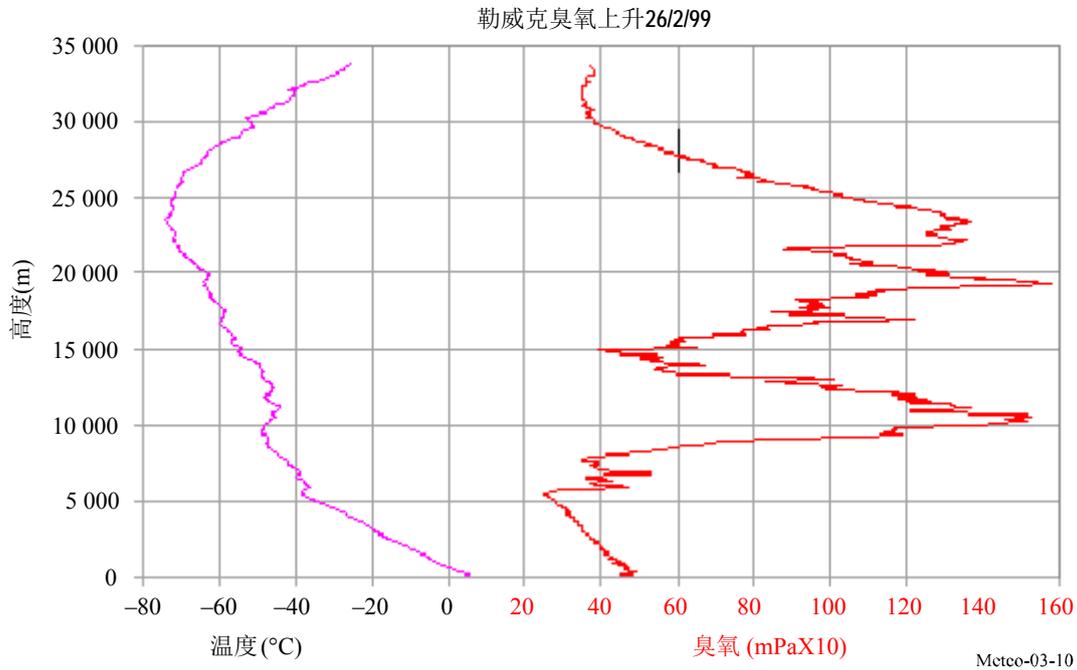


Meteo-03-09

图3-10是与图3-8所示的同一个英国地点臭氧垂直结构的测量示例。在此，臭氧的部分压力与温度的同时测量一起被用曲线表示为高度的函数。臭氧测量每周进行数次，以便支持正在进行的科学研究。测量结果被立即传送给数据收集中心，该中心协调在类似纬度的许多其它站点的观测。如果正在发生严重的臭氧空洞，将发出警告。在该日，对流层（即5公里以下的层）的臭氧一般比较低。在平流层，人们发现10公里和20公里处的臭氧浓度较高，但15公里处不是这样。科学界组织各种测量来确定平流层中低臭氧浓度的起源。这可能是由于臭氧从低浓度地区的自然运送。

图 3-10

采用臭氧无线电探测仪垂直测量臭氧分布



3.5 各国在气象辅助业务操作中差异的原因

3.5.1 可用技术的差异

尽管绝大部分无线电探空仪系统都是从数量有限的国际商业供货商那里购买的，一些国家的经济或政治条件要求在该国建立无线电探空仪的国内生产设施。在实践中，国内系统所取得的进展在过去的20年中要落后于商业提供商在无线电探空仪系统发展方面所取得的进展。由此，尽管世界各地使用的商业供应系统中绝大部分技术都是5年以内的，但一些国家系统仍基于30-40年之前的老技术。这些国家系统的测量对所有气象人士而言非常重要，必须给予这些国家足够的时间来引入更具频谱效率的升级系统。

3.5.2 高空风气候学的差异

从图 3-9中可以看出，该次飞行的气球在爆炸前从发射地点飘移了280公里，无线电探空仪随后通过降落伞下降到地面更远的距离。为在这些距离获得可靠的风数据，采用可以接收GNSS信号的无线电探空仪至关重要。通常，气球并不会飘移这么远。在北半球冬季高纬度，16公里以上高度的风通常并不是围绕着地轴对称地分布。因此，欧洲要比北美更容易发生平流层强风。另一方面，许多国家的高空风总是较弱。在高空风条件方面存在着差异导致相关国家无线电探空仪网络操作条件之间的显著差别。在一些国家（例如在热带地区），无线电探空仪总是保持高仰角和短距离；而在另一些国家，无线电探空仪必须在地平线5度以下的仰角进行跟踪，距离超过200公里。

在气球仰角保持较高的地区（特别是仰角很少低于15度时），可以通过采用低成本、无需接收和处理NAVAID/GNSS信号的无线电探空仪来降低无线电探空仪测量的成本。通过在基站采用扫描定向天线来追踪无线电探空仪。如果无线电探空仪在1 680 MHz附近频率发射，一个适当的定向天线远远小于403 MHz附近频率的备选天线。出于各种原因，403 MHz附近的频率更适合于长距离无线电探空仪操作，可在整个上升过程中提供良好的接收和准确的风。

用于1680 MHz二次雷达的无线电探空仪或许十分廉价，因为它们既无NAVAID/GNSS接收器，也无气压传感器，因此，一些国家没有其它替代选项。

在许多发达国家，雇佣一个操作员来监控无线电探空仪测量的成本已经太高，对可从远距离站址全自动进行监控的气球发射系统的要求正在增长，许多这样的系统已在使用中。这些系统都使用工作在400.15-406 MHz频段内的NAVAID/GNSS无线电探空仪。自动系统需要至少两个可用的无线电探空仪，处于该频段内不同的工作频率上。如同人工操作一样，如果由于气球过早失效而导致第一次无线电探空仪发射失败，无线电探空仪仍可继续发射。此外，另一个从附近站址发射的无线电探空仪可能早已在使用标称台站频率。自动发射系统在发射前扫描400.15到406 MHz之间的频率，确保没有无线电探空仪在其范围内在选定的频率上发射。在两种情况中，必须拥有第二个频率，以便获取工作测量。

3.5.3 网络密度的差异

WMO定义并定期回顾气象辅助网络全球和区域最小密度要求。取决于网络密度，气象辅助业务的频谱需求在各国都不相同。任何频谱需求的预测必须基于包括国防和环保部门在内的整个业务的用户团体。更高的网络密度要求更大的频谱效率。操作更大密度网络的国家通常拥有资金来采购更具频谱效率的气象辅助发射机。这些国家也往往是每日大气条件变化最大的国家。操作低密度网络的国家也许没有操作大量台站的资源。

3.5.4 401-406 MHz频段的使用

一些欧洲国家操作非常密的网络，采用该频段内最小飘移和窄带发射的无线电探空仪。其他一些国家操作宽带二次雷达系统，该系统中地面站向无线电探空仪发送一个脉冲，无线电探空仪对脉冲做出回应并发送气象数据。在两种情况中，几乎需要占用整个400.15-406 MHz频段用于操作，还应考虑到在401-403 MHz之间，气象辅助业务需要与EESS（地对空）和卫星气象（地对空）业务的数据采集平台发射进行协调。

世界有一些地区的发射台站数量有限，在这种情况下，可能拥有采购可为其它使用释放该频段一部分频谱的发射机的资源。澳大利亚即是其中一例。在此并不需要整个频段，该国主管部门选择将这频段的一部分用作其它无线电通信业务。因此，在一些国家频谱可用于其它使用，但在世界许多地区，气象辅助操作需要使用整个频段。世界气象组织得出结论，在可预见的未来，气象辅助操作需要使用整个400.15-406 MHz频段，但也承认400.15-401 MHz频段内的标准无线电探空仪操作在未来不太可能，因为与其它卫星业务的同频道共用是不现实的。

3.5.5 1 668.4-1 700 MHz频段的使用

1 668.4-1 700 MHz频段的情况有别于401-406 MHz频段。特别是，尽管整个频段划分给了气象辅助业务，但该频段也同样作为主要业务划分给了卫星气象业务。气象辅助和卫星气象同频道操作互不兼容，已经采用了频段分割的方法。气象辅助给卫星气象业务地面站造成了很大的干扰电平。世界各国1 680 MHz使用各不相同，但在世界数个地区（北美、欧洲和亚洲），已经有1 675-1 683 MHz子频段可用于气象辅助操作。在讨论气象辅助业务在1 668.4-1 700 MHz内的需求时，必须铭记该频段通常仅有一部分可用。绝大多数国家可以在7-8 MHz的频谱内进行操作，而在许多国家仍需要15 MHz以上的频谱来支持各种操作。

3.5.6 保留两个频段的要求

两个射频频段可以提供给气象辅助操作被认为对继续成功地进行气象操作至关重要。首先，在欧洲和北美多个国家考虑到与其他业务的现有共用安排，需要两个频段来满足气象辅助操作的频谱要求。全局的、研究和军事气象辅助操作在仅有一个频段的情况下无法得到满足。此外，每一个频段提供了不同类型的气象辅助操作所需的独特特性。401-406 MHz频段提供较低的传播损耗。该传播损耗在疾风导致基站与无线电探空仪之间长斜距的世界各地提供了有利条件。较低的传播损耗也允许使用更简单的、更小的接收天线来跟踪飞行。该频段内的气象辅助操作采用一种无线电导航（GNSS）来进行风测量，因为无线电定向天线过于庞大。出于预算和/或国家安全原因，一些主管部门选择1 668.4-1 700 MHz频段。对于该频段，无线电定向气象辅助消除了无线电导航电路的必要性。这降低了一次性设备的成本。一些国家操作的气象辅助系统不依赖于国际NAVAID/GNSS系统，因为这些提供并不总是可用。

3.6 未来趋势

尽管气象辅助设计通常都非常简单且采用低成本的组件，该领域还是发生了变革并且仍将继续发展，以改善系统的性能。如前所述，许多用于改进的投资集中在传感器质量方面，并不总是涉及系统的遥测链路部分。但是，在给定区域增加频率指配来支持全局和非全局性操作的要求正在不断增加，并也证明了在射频特性方面的改进。

此外，在无线电探空仪上采用GNSS来测风已经促使在NAVAID/GNSS无线电探空仪的频谱效率方面的显著改善。在大部分国家，这也使得在高空风及高度测量精确度方面获得明显改善。目前低成本小型GNSS接收机的面世使得GNSS信号能够完全在气象辅助系统上处理，并只传送风和定位数据。目前许多用途不再需要传送“差分”GNSS数据来恢复GNSS数据的质量；而且这可减少需要传送的数据量。

第4章

气象雷达

页码

4.1	引言	38
4.1.1	气象雷达类型	38
4.1.2	雷达公式	39
4.2	天气雷达	40
4.2.1	用户要求	40
4.2.2	天气雷达网络	40
4.2.3	反射率的操作问题	42
4.2.4	天气雷达发射方案、扫描策略和操作模式	43
4.2.5	多普勒雷达	48
4.2.6	双偏振雷达	48
4.2.7	常规气象雷达基础数据产品	48
4.2.8	天线方向图和天线动态	52
4.2.9	目前和未来的频谱需求	53
4.2.10	天气雷达的弱点	56
4.2.11	与天气雷达共用频谱的系统的弱点	64
4.2.12	未来趋势	64
4.3	风廓线雷达（WPR）	65
4.3.1	用户要求	66
4.3.2	操作与频率问题	67
4.3.3	目前和未来的频谱需求	68
4.3.4	风廓线系统的共用问题	69

4.1 引言

在无线电定位业务引导下运行的地基气象雷达，用于业务气象、天气预报、大气研究和航空及海上导航。大多数天气下是全天24小时持续运行，并在紧急气象和水文报警工作中发挥着关键作用，这些雷达是避免山洪暴发或大暴雨造成生命和财产损失的最后一道防线，因而是气象学中最著名的救命工具。

气象雷达通常实行体积扫描、笔形波束雷达，它可探测和测量降水强度和风速。它们被用于预测飓风、龙卷风和其它恶劣气候事件的形成，并对一路造成破坏的风暴进行跟踪。现代雷达使我们能够跟踪大小风暴，提供有关降水率和强风及地电位的信息，预报员可将其用于预测山洪的可能性。气象雷达还主要关注航空气象服务，特别是探测飞机积冰状况以及为空中航行避免灾害性天气。

本章节论述了气象工作中普遍使用的地基雷达及其与其它雷达相比具有的特点。

4.1.1 气象雷达类型

天气雷达是第一种也是最为人们所熟悉的雷达类型。这类雷达提供有关其所在地周围区域内的数据。众所周知，电视的天气预报节目通常显示这些雷达输出的数据。表4-1列出了一系列通常用于天气雷达运行的频段。

表 4-1

主要的天气雷达频段

频段 (MHz)	气象领域常用频段名称
2 700-2 900	S频段
5 250-5 725 (主要在5 600-5 650 MHz)	C频段
9 300-9 500	X频段

风廓线雷达（WPR）是第二种气象雷达。这些雷达可提供雷达正上方大致呈锥形体积的风速数据。如果配备齐全，例如配备扬声装置或RASS（无线电-声学探测系统）系统，则WPR还可测量大气虚温（作为高度的函数）。WPR使用的无线电频段通常设在大约50 MHz、400 MHz、1 000 MHz和1 300 MHz（详见第4.3段）。

第三种是较少见的用于跟踪飞行中的无线电探空仪的辅助雷达。关于无线电探空仪的第3章谈及了这类雷达的使用。

第四种气象雷达是云雷达。这些雷达通常在大约35 GHz和94 GHz频段运行，因为大气衰减相对较低。云雷达可用于研究雷达系统敏感度范围内的云及其它粒子的微物理特性。

所有雷达都是靠发射无线电信号运行的，而这些信号受到车辆、飞机、降雨和大气湍流等目标的反射。虽然发射的信号是强有力的，但雷达返回的信号却很弱。这是因为辐射信号必须沿路径往

返一次，首先从雷达发至目标，然后返回雷达，导致在往返途中大气衰减。如果使用的是气象雷达，这一弱点会更加明显，因为目标（无论是降水（雨、雹、雪...）还是采用多普勒雷达时的降水、昆虫或仅仅是大气湍流）都不是十分有效的反射器。返回信号的多少关系到目标的反射率，而这会因为目标的大小和性质的差异而有所不同。通过提高发射机功率、采用大型显示高增益波束宽度的天线产品、高度敏感的接收机和长信号整合时间，可从不同方面满足接收这些薄弱信号的需求。因此，相对“平静”的频谱，即没有人为电子噪声和干扰的频谱，是绝对必要的。

4.1.2 雷达公式

雷达公式（4-1）介绍了返回功率和雷达及目标特性之间的关系。该公式可表示如下：

$$\overline{P_r} = \frac{\pi^3 \cdot P_t \cdot G^2 \cdot \theta^2 \cdot c \cdot \tau \cdot |K|^2 \cdot L \cdot Z}{2^{10} \cdot \lambda^2 \cdot R^2 \cdot \ln 2} \quad (4-1)$$

式中：

- $\overline{P_r}$ ：平均返回功率（瓦）
- P_t ：发射机输出功率（瓦）
- G ：天线增益（无量纲）
- K ：复杂折射率（无量纲）
- λ ：雷达波长（米）
- c ：光速（米/秒）
- θ ：天线半功率（3 dB）波束宽度（rad）
- τ ：脉冲宽度
- r ：目标距离
- L ：与传播和接收机检测相关的损耗系数（dB）
- Z ：有效雷达反射率（立方米）。

将条件进行重组可以得出易于理解的雷达公式（4-2），从而显示出提供给以常数、雷达和目标因子计算的不同接收功率数值。

$$\overline{P_r} = \frac{\pi^3 c}{1024 \cdot \ln 2} \cdot \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \theta^2 \cdot L}{\lambda^2} \cdot |K|^2 \frac{Z}{R^2} \quad (4-2)$$

\uparrow \uparrow \uparrow
 常数 雷达因子 目标因子

在满足以下假设的情况下，公式（4-2）可用于分布式目标：

- 目标占据脉冲的全部容积
- 粒子分布在数据提供区域
- 降水粒子为均匀介质球，与雷达波长相比，其直径较小
- 粒子的大小可满足瑞利散射条件
- 在作为研究对象的容积 V 当中，介电常数 $|K|^2$ 和散射体的规模分布是均匀的

- 可利用高斯型谱带模拟天线辐射图
- 入射和后散射波为线偏振光
- 多次散射效应受到忽视。

公式 (4-3) 给出了雷达公式 (4-2) [Doviak和Zrnica, 1984年]的对数形式:

$$Z(Az, El, R) (\text{dBZ}) = 10 \log (P_r) + 20 \log (R) - 10 \log (L_p) + 10 \log (C) \quad (4-3)$$

此公式最适用于说明不同系统参数的重要意义, 以便进行统一的反射率测量。这些参数包括:

- 接收功率 P_r (W),
- 范围 R (m),
- 方位角和仰角 (度),
- 过量传播损耗 L_p (dB), 和
- 所谓雷达常数 C 。

雷达常数通常包括天线波束宽度、接收机转换增益和系统损耗等因素。

必须强调指出的是, 为使雷达跟踪离散目标, 雷达公式应提供与 $1/r^4$ (r 为距离) 成比例接收信号。气象雷达的情况则大相径庭, 因为降水等目标通常能够占满狭窄的雷达波束。在这种情况下, 雷达公式应提供与 $1/r^2$ 成比例接收信号, 气象雷达因此能够提供更大的检测范围, 但这也意味着它们比典型的空管类雷达更易于受到干扰影响。

4.2 天气雷达

4.2.1 用户要求

气象工作者利用天气雷达监测、定位和测量云中的含水量或降水量, 并利用降水或大气粒子的运动确定风速和风向。雷达测量具体时间段的降水强度, 以及接近或漂离天气雷达天线的降水或大气粒子的运动, 以测量气候事件内部的循环交替。这是测量龙卷风或洪水等极端天气并提供预警的关键要素。用户对天气雷达的主要要求是检测固态和液态降水, 并估算出降水量和径向速度⁴。

4.2.2 天气雷达网络

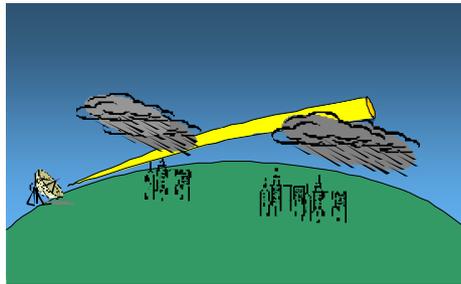
天气雷达的一大局限是, 从一特定气象事件反射的回波强度随着与雷达距离的加大而趋于弱化。这不仅是由于自由空间及其它大气衰减, 还由于随着与雷达距离的加大, 雷达波束距地表更高 (这是地球的曲度和波束的仰角引起的, 而且波束也变宽。(见图4-1)

这就减少了受到波束照射的气象事件的比例。虽然雷达仍能够看到事件的上半部, 但可能看不到下半部。在距雷达一定距离以外发生的降水可能无法发现, 或以减弱的强度出现, 从而限制了雷达的定量运行范围。

⁴ 这是接近或漂离 (径向) 雷达的降水的速度。未提供降水强度的信息。接近雷达的降水为负速度, 漂离雷达的降水为正速度, 而垂直接近雷达波束 (螺旋状围绕雷达) 的降水则为零径向速度。

图4-1

雷达波束随距离增高的综述

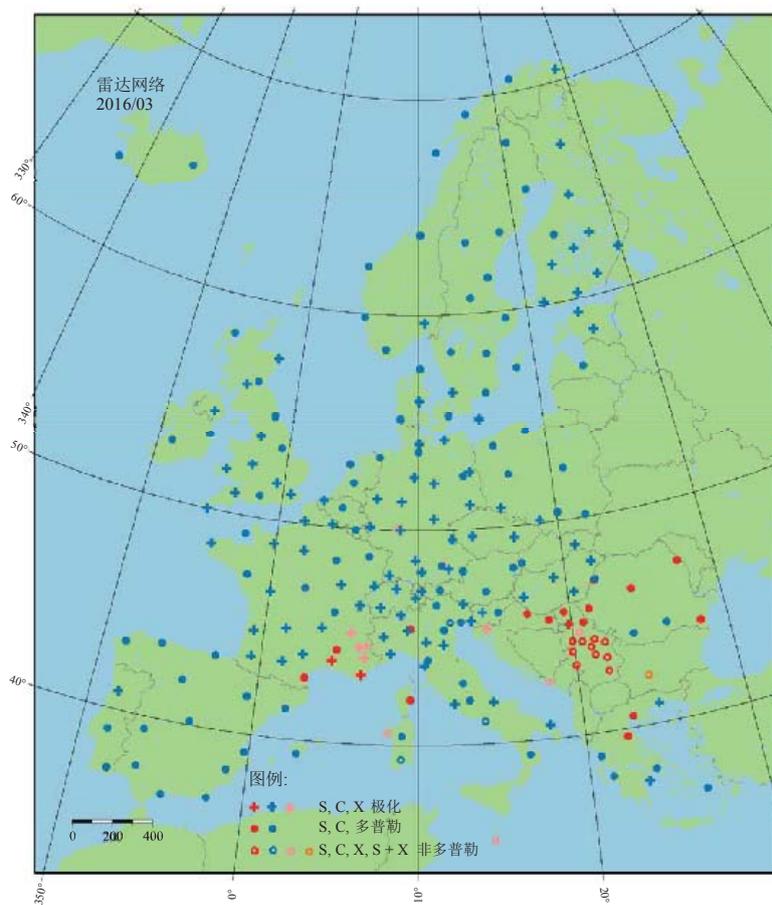


Metco-04-0 1

为克服这一局限性，通常在分布网络中等距部署多个雷达。这些网络每天24小时不间断运行，通常覆盖广大地区，如多个国家甚至一个大洲的部分地区，以检测和跟踪气象变化，从而实现早期天气灾害报警。图4-2介绍了部署在西欧的这类由S、C和X频段雷达构成的网络。

图 4-2

天气雷达网络实例
(2016年3月更新)



Metco-04-02

4.2.3 反射率的操作问题

反射率是一个雷达术语，是指雷达目标返回能量的能力。降雨的反射率 η 与水的相对电容率 ϵ_r 、水滴直径 D 和波长 λ 相关。上述容积 V 中包含的雨滴的反射率可用以下公式表示（4-4）：

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \sum_j D_j^6 / V \quad \text{m}^{-1} \quad (4-4)$$

式中 $|K|^2$ 以0.93表示液体水，用0.18表示冰。反射率用于估算降水强度和降雨量，并且是返回功率的测量标准。

对于已知（或设定）雨滴大小的降水事件，体积反射率可与每单位体积的总液体水量相关。总水量以及水滴大小的分布和相应的雨滴最终速度，都有助于对降雨量的计算。

雷达反射率因子 Z 可定义为：

$$Z = \frac{1}{V_e} \sum_i D_i^6 \quad (4-5)$$

式中：

Z : 从体积中介质球总量的散射雷达剖面推导出的体积

D : 水滴直径

V_e : 有效水滴体积。

以下公式说明，体积 Z 与每单位体积 η 的雷达剖面相关：

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z \quad (4-6)$$

式中：

Z : 体积

η : 每单位体积的雷达剖面

λ : 入射波长

$|K|$: 复杂的折射率。

鉴于散射体积内的雨滴的直径不一，雨滴分布可大体表示为：

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D) \quad (4-7)$$

式中：

$N(D)$: 直径的数密度

D : 直径

ΛD : 尺寸区间

N_0 和 Λ : 特定气象事件的常数。

在已知雨滴大小分布的情况下，一单位体积总和 $\sum_i D_i^6$ 可表示为：

$$Z = \int_0^{\infty} D^6 N(D) dD \quad (4-8)$$

但垂直空速为零时，降雨量 R 可表示为：

$$R = \frac{\pi\rho}{6} \int_0^{\infty} D^3 v_t(D) N(D) dD \quad (4-9)$$

式中：

- R : 降雨量
- D^3 : 与 Z 成正比的雨滴体积
- $v_t(D)$: 直径为 D 的雨滴的终速
- ρ : 水密度。

当 N_0 为一个常数时，公式 (4-10) 可以说明暗含的 Z - R 关系：

$$Z = AR^b \quad (4-10)$$

式中 Z 通常表示为 $\text{dBZ} = 10 \log Z \text{ (mm}^6/\text{m}^3)$ ，而且 A 和 b 为常数。（ A 是散射常数，而 b 是比率乘数。）Marshall-Palmer 是最常用的 Z - R 关系，其中： $Z = 200 \cdot R^{1.6}$ ，而 R 可以 mm^6/mm^3 和 mm/h 表示。然而， Z - R 关系不是唯一的。 A 和 b 都取决于随降雨类型和强度变化的水滴大小分布（DSD）。

4.2.4 天气雷达发射方案、扫描策略和操作模式

4.2.4.1 发射方案

为保证所谓“扫描策略”（通常在5-15分钟的范围）包括的体积扫描程序，气象雷达在不同仰角利用各种不同的发射方案、采用多种不同的脉冲宽度、PRF和旋转速度。没有一种“典型”方案，这些方案各异，取决于雷达性能、针对必要气象产品的雷达环境等一系列因素。因此对这些方案进行调整使之充分满足需求。

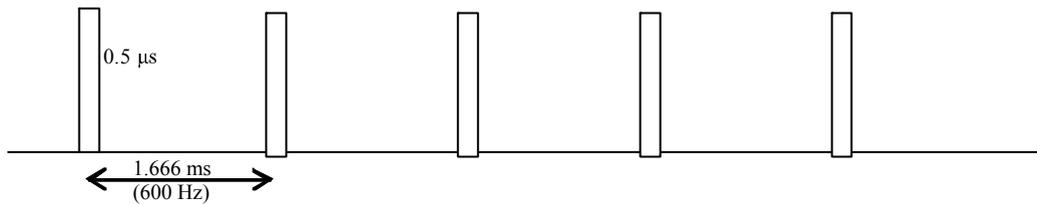
例如，最近对C频段气象雷达进行的一项调查，得出了以下大量不同的发射方案参数：

- 0°至90°的运行仰角
- 0.5至3.3 μs 的未压缩脉冲宽度（对于业务雷达），而有些雷达采用脉冲压缩，脉冲宽度为30 μs 至350 μs （注意，采用脉冲压缩会增加必要的带宽（3-6 MHz））
- 250至2400 Hz的脉冲重复频率（PRF）（对于业务雷达）。现有一些雷达的PRF达20 000 Hz
- 1至10 rpm的旋转速度
- 用于执行不同发射方案的特定雷达，这些雷达综合了不同脉冲宽度和PRF，尤其是采用了固定、参差和交织PRF（如在执行单一方案期间使用不同的PRF）。

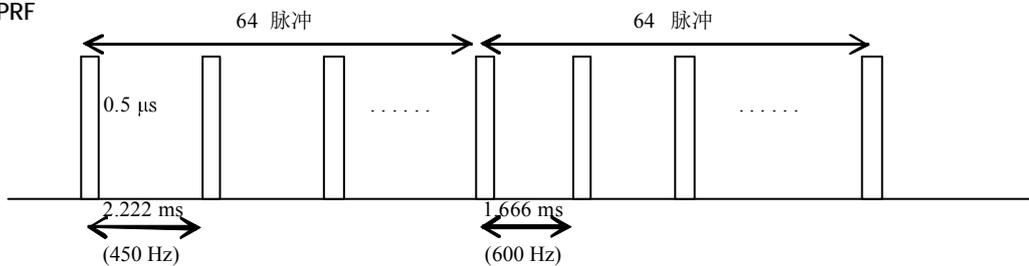
图4-3列举了不同发射方案的实例。

图4-3
几类天气雷达发射方案

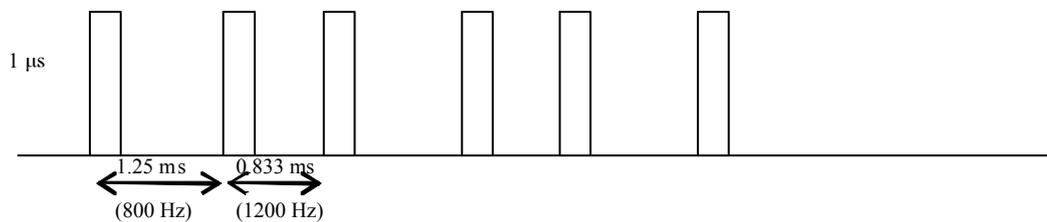
固定的 PRF



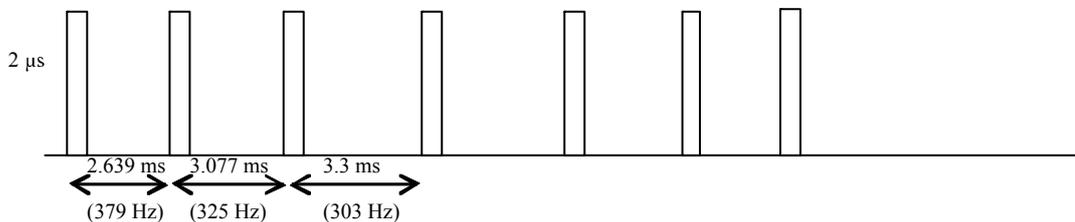
交错 PRF



双重交错 PRF (双 PRT)



三重交错PRF (三重 PRT)



Meteo-04-03

许多雷达在其扫描策略中都使用这些不同的发射方案，期间，在不同仰角和不同旋转速度传送一种发射方案。

必须强调的是，在上述范围内，与这些示例方案有关的PRF和脉冲宽度因雷达而各异。此外，对于某种方案而言，脉冲宽度因脉冲而各异。

此类扫描策略示例如下：

图4-4

天气雷达扫描策略描述

常见的扫描策略（总共约15分钟）：

- >采用配置2（2-rpm）的仰角为0.8°的1轮（30秒）
- >用于噪声校准（3-rpm）的仰角为10°的1轮（20秒）
- >采用配置3（3.167-rpm）的仰角为37、29、23、21、19、17、15、13、11、9.5、8.5和6.5°的12轮（19-s/turn）（总共3分47秒）
- >采用配置2（2-rpm）的仰角为0.8°的1轮（0.5分钟）
- >采用配置3（3.167-rpm）的仰角为6.5和5.5°的2轮（0.5分钟）（19-s/turn）（总共38秒）
- >采用配置3（3-rpm）的仰角为4.5、3.5、2.5、1.5和0.5°的5轮（20-s/turn）（总共40秒）
- >采用配置1（2-rpm）的仰角为0.5、1.5、2.5和3.5°的4轮（2分钟）
- >采用配置2（2-rpm）的仰角为0.8°的1轮（30秒）
- >采用配置1（2-rpm）的仰角为3.5和4.5°的2轮（60秒）
- >采用配置3（3-rpm）的仰角为10.5°的1轮（20秒）
- >采用配置2（3-rpm）的仰角为1.3°的1轮（20秒）
- >采用配置2（2-rpm）的仰角为0.8°的1轮（30秒）
- >用于噪声校准（3-rpm）的仰角为10°的1轮（20秒）

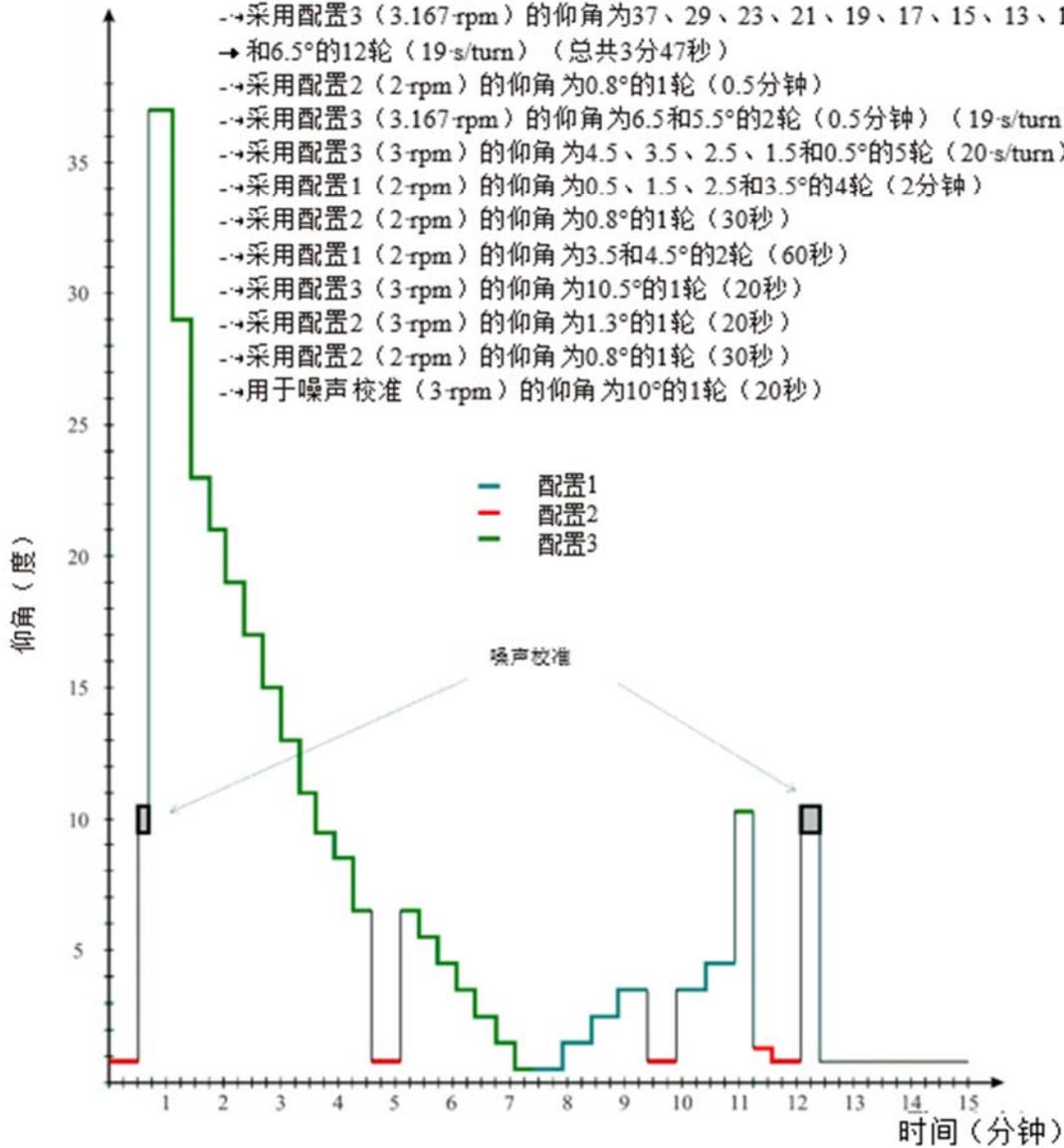
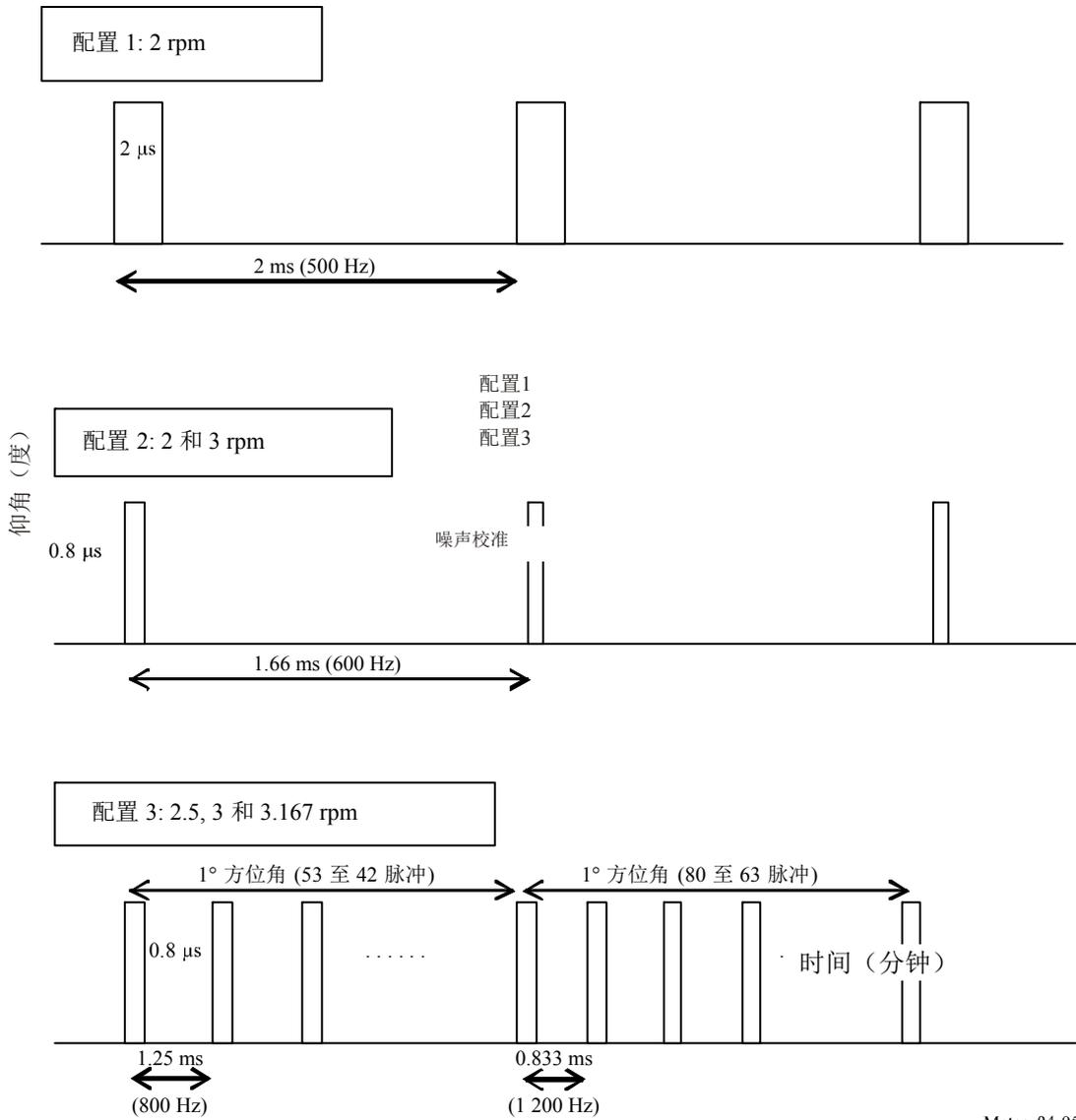


图4-5

与图4-4中扫描策略相关的发射方案



Mctco-04-05

4.2.4.2 噪声校准

考虑到气象雷达接收的反馈信号具有的弱点，需要从信号中提取噪声电平，以取得最准确的测量结果和相关的气象产品。

鉴于噪声电平 N 和有用信号 S （如气象信号反馈）的情况，气象雷达执行以下程序：

- 1) 雷达检查每个检测门的与有用信号 (S) 和噪声 (N) 相应的反馈信号，如 $N + S$
- 2) 为得出 S ，雷达从 $N + S$ 中提取噪声电平 N
- 3) 然后，雷达可根据 S 确定所有气象产品，如利用多普勒分析得出降水 (dBZ) 或风速的结果。

为获得更为精确的气象产品，信号S应尽可能准确，也就是说，雷达的噪声校准（也称之为“零检验”）成为一个关键问题。

因此，“零检验”是定期进行的，要么在定期的雷达发射期间（通过估算）、要么在具体的测量时段（见以下扫描策略实例）进行，在此期间可测量噪声。

在许多情况下，这种噪声测量是在没有任何雷达发射的情况下进行的（这尤其会对旨在以探测雷达信号来减少干扰的某些无线电系统的设计产生影响）。

总之，噪声校准期间收到的干扰将污染所有数据收集，直至进行下次的无干扰校准。此类干扰会导致报告的降水率低于实际情况，从而对业务和预警程序造成明显的后果。

4.2.4.3 气象雷达的运行模式

在美国的NEXRAD等一些网络中，雷达以用户可选的两种模式运行：晴空模式和降水模式。晴空模式需要用户手动选择。降水模式可在运行中随时手动选择或每当天气雷达探测降水时自动运行（基于预定值和反射率区域范围）。

总之，气象雷达采用了这两种模式。

4.2.4.3.1 晴空模式

晴空模式可使气象雷达具有探测降水活动早期信号的能力。

目前在低层速度和空气密度方面有某些有助于探测潜在降水的变量。雷达可利用慢扫描率结合低PRF实现高灵敏度。这种高灵敏度适用于在长距离探测大气条件的极细微变化。在雷达发射范围内几乎或完全没有对流活动时，晴空模式尤为有效，而且极适合于探测雷暴发展信号或其它类型灾害性天气信号。

气象雷达的高灵敏度是由于在晴空模式中的体积扫描模式，通过在晴空模式中选择一种模式，雷达天线能够在任意给定空间体积中延长停留时间并接收多个返回信号，同时还可在更低的S/N上运行。宽脉冲宽度和低PRF的使用可为给定的反射率dBz提供大约8 dB回波功率。

4.2.4.3.2 降水模式

降水模式的用途与晴空模式存在明显不同。降水模式的扫描率随着仰角而改变。这种依存性有助于在雷达总区域采样中仰角尽可能达到最高数值。降水模式可利用多体积覆盖模式（VCP）实施不同类型扫描策略（见§ 4.2中示例）并在不同仰角采样。降水模式中通常监测的天气事件与涉及对流风暴（阵雨、冰雹、强雷暴、龙卷风等）及大尺度天气系统的降水发展有关。

4.2.4.4 固定回波消除

所谓固定回波包括若干暗含的固定部分：一个包括低频散射的部分，另一个包括较高频（例如，因为植被在风中起伏不定）的部分。非降水目标引起的回波被称为杂波，因此应该消除。在用的气象雷达采用不同的地面杂波消除方法：

- 多普勒滤波采用高通滤波器，以减少地面杂波。此程序对径向风速高于多普勒滤波器截止频率的情况有效。
- 统计滤波是以降雨变量高于地面杂波反射率变量的实际情况为依据的。统计滤波程序对于降雨径向风速为零（切线降雨）的情况有效。
- 将偏振计雷达用于降雨和地面杂波鉴别。

4.2.5 多普勒雷达

多普勒天气雷达已在大气研究中使用了30多年，用于测量雷暴内部的对流和检测阵风锋，而今被广泛用作应用型天气雷达系统。与早期雷达不同，多普勒设备不仅能够确定反射目标的存在和位置，还能确定其径向速度，从而利用速度方位显示扫描，测出风速、发现龙卷风并测量风场。

地面杂波消除是一项重要功能。这一领域的新研发成果以klystrons（当今最先进的）、行波管（TWT）或固态等相干发射机为重点。常规雷达频谱相位纯度受到前一代磁控技术的局限，但是在现代磁控技术中，相位纯度足以进行有效的杂波对消。然而，现有的磁控技术能够经济地提供提高信噪比所需的高平均功率。

4.2.6 双偏振雷达

偏振雷达或双偏振雷达可传送水平（h）偏振和垂直（v）偏振脉冲，这项技术能够通过遥感其形态和均一性识别散射。这类雷达可显著改进非偏振系统的降雨估算、降水分类、资料质量和天气灾害探测。

降水估算目前采用的是下落的雨滴往往会压扁（扁球），扁平度随雨滴直径的增大呈水平方向扩展。反射率与双偏振场相结合能够对Z-R关系（4-10）的A和b系数作出更有效的评估。其它算法，是以差分相位 $\phi_h - \phi_v$ 和差分衰减为依据，因此极有希望进一步改进对降雨的准确评估。

除其形状外，水凝物还具有介质常数的特点，这是计算整个截面散射和衰减的主要因素。水凝物的介质特性随雷达频率变化，因此液体水和冰之间存在巨大差异。利用这些特点可以通过实施算法，鉴别降雨和降雪的区别，并利用差分衰减测量，对云中的液体水和冰分门别类。

4.2.7 常规气象雷达基础数据产品

一架多普勒气象雷达可从信号反馈中生成三类基础数据产品：基础反射率、平均径向速度和频谱宽度。所有较高级别的产品都产生于这三种基本产品。基本产品的准确性通常被列为雷达设计的主要性能要求。如果没有表4-2提供的必要的低层产品准确性，较高层衍生产品也就不可能做到准确无误。

表 4-2
具代表性的met雷达基础数据准确性要求

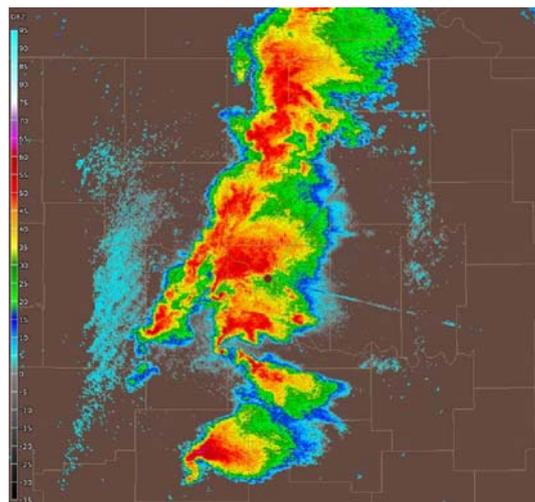
基础数据产品	设计准确性要求
基础反射率	< 1 dB
平均径向速度	< 1 m/s
频谱宽度	< 1 m/s

4.2.7.1 基础反射率

基础反射率用于多种天气雷达应用，其中最主要的是降雨量估计。基础反射率是反馈脉冲的强度，是根据反馈功率的线性平均值计算的。雷达受到的任何干扰都会加大反馈脉冲功率，使反射率数值出现偏差。如果偏差超过基础数据准确性要求，就会危及反射率测量工作。

图4-6

2011/05/24 22:34 UTC龙卷风突发期间KOUN的反射率



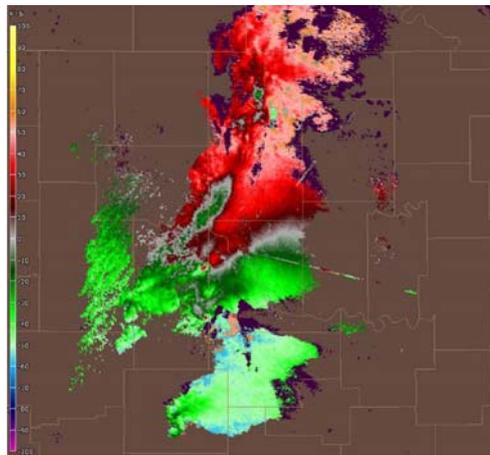
Meteo-0 4-06

4.2.7.2 平均径向速度

平均径向速度亦称为平均多普勒速度，表示目标在特定体积抽样中的反射率加权平均速度。平均径向速度是指一阶频谱密度；而径向速度则是指基础数据。它们通常是根据大量连续脉冲确定的，并根据单滞后复方差变量计算得出的。复协方差变量对雷达脉冲之间的多普勒信号矢量角位移作出估计。多普勒矢量角速度等于脉冲间时间间隔除以位移。多普勒频谱透露出反射率和雷达体内的雷达加权速度分布。

图4-7

2011/05/24 22:34 UTC龙卷风突发期间KOUN的径向速度



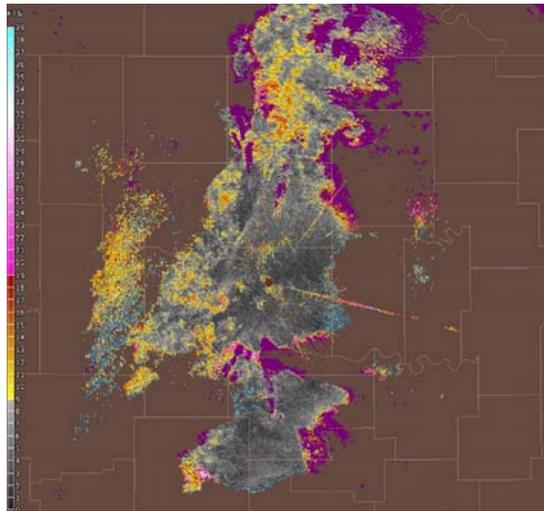
Metco-04-07

4.2.7.3 频谱宽度

在气象雷达设计中，频谱宽度是根据假设高斯频谱密度的单滞后关联性算出的。它既是对雷达抽样容量内速度弥散的测量，也是速度谱的标准偏差。频谱宽度取决于整个脉冲容量的反射率及速度梯度和脉冲容量内部的紊流[Doviak 和 Zrnice, 1984年]。

图4-8

2011/05/24 22:34 UTC龙卷风突发期间KOUN的谱宽



Metco-04-08

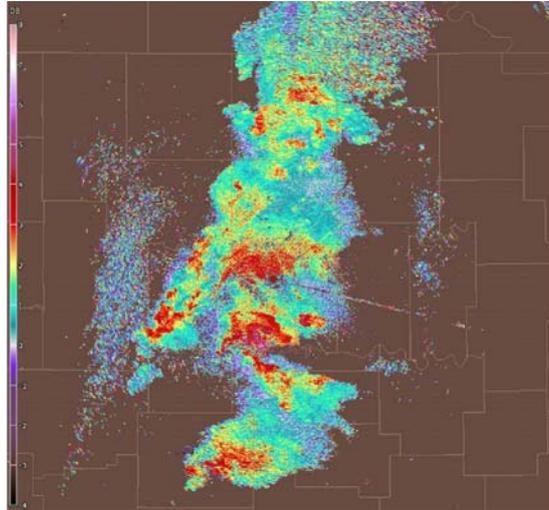
4.2.7.4 双偏振气象雷达产品

4.2.7.4.1 差分反射率

差分反射率是与偏振计气象雷达相关的产品，并且是水平和垂直功率反馈的比率。此外，它还是一个很好的粒子形状指标。而形状又有助于对粒子的平均大小作出准确估计。

图4-9

2011/05/24 22:34 UTC龙卷风突发期间KOUN的差分反射率



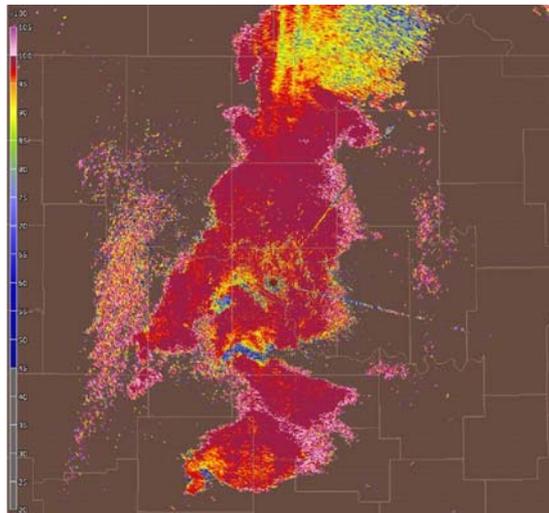
Metco-0 4-09

4.2.7.4.2 相关系数

相关系数是偏振计气象雷达产品，体现了水平和垂直功率反馈的统计相关性。相关系数对水平和垂直偏振回波的反射特性作了说明，为具有雨雪等混合降水类型的地区提供了一个很好的指标。

图4-10

2011/05/24 22:34 UTC龙卷风突发期间KOUN的相关系数



Metco-0 4-10

4.2.7.4.3 线性退偏比

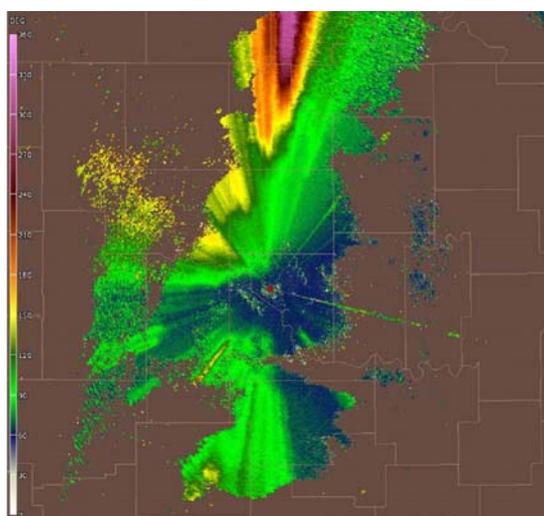
另一种偏振气象雷达产品是线性退偏比，它是水平输送脉冲的垂直功率反馈或垂直脉冲的水平功率反馈（未显示）之间的比率。与相关系数一样，它为混合降水类型地区提供了很好的指标。

4.2.7.4.4 差分相位

差分相位是水平脉冲和垂直脉冲之间反馈相位差的对比。这种相位差是由于沿传播途径前进的水平和垂直偏振波的周期（或波长）数量差异造成的，不应将它与多普勒频移相混淆，因为这种频移是云和降水粒子的运动引起的。与完全依赖于反射功率的差分反射率、相关系数和线性退偏比不同的是，差分相位是一种“传播”效应，同时也是降雨率以及降雨造成衰减的极好估计算子。从差分相位衍生的比差分相位（未显示）表明了相移速度。这对于确定大雨地区尤为有效。

图4-11

2011/05/24 22:34 UTC龙卷风突发期间KOUN的差分相位



Meteo-0 4-11

4.2.7.5 衍生数据产品

处理器利用基础数据生成更高级的衍生数据产品。由于来自不同雷达的产品各不相同，而且产品数量很大，本文件不去详细探讨衍生数据产品。为保证衍生数据产品的准确性，必须保持基础数据产品的准确无误。

4.2.8 天线方向图和天线动态

4.2.8.1 天线方向图

气象雷达通常使用抛物面反射器天线，可产生笔形波束天线方向图。水平面和垂直面的天线动态被认为可生成体积扫描。此类动态的示例可参见上文§ 4.2.4.1。

气象雷达天线方向图的三种数学模式现已投入使用，详见建议ITU-R F.699（峰值旁瓣）、ITU-R F.1245（平均旁瓣）和ITU-R M.1652。尽管抛物面天线具有代表性，但这些建议往往会略微高估笔形波束天线方向图的波束宽度。

注意到，目前在ITU-R中没有明确的雷达天线辐射图方程式来表示此类笔形波束天线。

4.2.8.2 体扫天线移动

天线在恒定仰角水平面旋转可实现体扫产生横切所需的水平和垂直覆盖。每次横切之后，预设值可提升天线仰角。最低仰角通常在 -2° 到 1° 范围，最高仰角在 20° 到 30° 范围，不过有些用途可使用达到 60° 仰角。天线的旋转速度依天气条件和当时所需的产品而有所不同。旋转速度和仰角范围、中间仰角步进以及脉冲重复频率等均可加以调整，以达到最佳性能。天线缓慢旋转可在各径向长时间停留，实现最大灵敏度。

当要尽快覆盖整个体积时，天线高速旋转可使操作员能够在短时间内生成体积扫描。仰角步进变化和旋转速度变化使体积扫描获取时间从1分钟到15分钟不等。与其它以恒定仰角旋转的雷达相比，完整体积扫描的长时间周期原因在于必须要获得统计上显著的结果采样。

4.2.8.3 其它天线移动策略

气象雷达还可将其它天线移动策略用于特殊用途和研究。扇形扫描可用于获取部分仰角切面。扇形体积扫描是对 360° 方位角的一部分进行体积扫描，在这一过程中天线可采用多个仰角切面。第三种模式是使天线保持恒定方位角和仰角，以监测大气的一个具体点位。所有这三种策略均可使雷达操作员专注于大气的一个具体部分。

4.2.9 目前和未来的频谱需求

对于一些雷达应用而言，频段（或波长 λ ）的选择主要是在范围/反射率、雨衰、气象变量准确性及成本之间进行权衡的结果，范围/反射率随 λ^{-4} 变化。雨衰是主导因素，它会随 λ 的增加而减少，少到在分米范围波长可以忽略不计。例如，Ka频段（约35 GHz，8.6毫米波长）很适用于检测非降水云（ $\leq 200 \mu\text{m}$ ）中出现的小水滴，而S频段（2700-2900 MHz，10厘米波长）则被选用于检测热带和温带气候条件下极远距离（多达300公里）的暴雨。

4.2.9.1 天气雷达频段

气象雷达最常用的三个频段是S频段（标称频率2 700-3 000 MHz）、C频段（标称频率5 250-5 725 MHz）和X频段（标称频率9 300-9 500 MHz）。指定频段的准确频率值详见公认标准（IEEE 2002）。

就定量准确度和长距离性能而言，S频段（2 700-3 000 MHz，10.7厘米标称波长）总体上是最佳选择。这是由于气态吸收和降水衰减的衰减值低（Fabry, 2015; Doviak, 1993）。较长的波长还有助于减小范围-多普勒模糊问题（Doviak, 1978和1979）。然而，成本是选择S-频段的一个因素，因为较长波长需要更大的硬件组件和更大的天线，以达到对波束宽度和增益的既定要求。

C频段（5 250-5 725 MHz，5.4厘米波长）通常用于温带气候以及需要覆盖的地理面积很小的国家。它可以是上述参数之间的相关折中方案，尽管其实际能力在100公里以上受到局限，但具有长距离（多达200公里）检测降雨的能力，还因使用较低功率和较小规格的天线，具有较同等空间分辨率的低频雷达成本更低的优势。

X频段（9 300-9 500 MHz，2.5-3.2厘米波长）天气雷达更为敏感，能够检测出更小的粒子，但由于承受更高的衰减，因而仅用于极短距离（约50公里）的天气观测。这些雷达可用于云形成的研究，因为它们可以检测到微小的水粒子，还用于检测降雪等轻型降水。此外，由于它们体积小，X频

段天气雷达通常用作移动便携设备。这些雷达也可用于探测风的变化，尤其是航空用途（风切变、涡旋……）。

4.2.9.2 衰减

当电磁波经由大气传播时，水汽、气态吸收、云和降水会对电磁波造成衰减（Fabry, 2015）。到目前为止，降水是最大的衰减原因，特别是大雨。传播物理学表明：根据雨强的不同，C频段（5.0厘米）的衰减率（单位：dB/每单位长度）大约是S频段（10.0厘米）的6-8倍（Bean和Dutton, 1966, Burrows和Attwood, 1949）。X频段的衰减问题则更严重，以6毫米/小时的雨强计算，其衰减率是S频段的100多倍，比C频段高15倍多。

文献中充分记录了在较短波长上衰减的严重影响。在20世纪80年代，美国国家强风暴实验室开展了5厘米与10厘米波长雷达之间性能的直接对比，这些测试表明，在大雨中使用5厘米波长会严重影响强风暴预报和预警业务（Allen, 1981）。

衰减订正对于较短波长尚存疑问，因为需要有极准确的功率测量精度（Hitschfeld, 1954）。C频段和X频段支持衰减订正算法所必需的反射率校准精确度要求，超出了目前对美国下一代雷达（NEXRAD）计划的要求，而且实际上难以实现。将偏振测定法用于天气雷达大大改变了现状，因为差分相位可得出衰减估值，而并不依赖于反射率校准精确度。

与衰减略有关联的问题促使气象雷达需要采用线性偏振。在美国NEXRAD天气监视雷达 - 1988多普勒（WSR-88D）S频段雷达部署之初，该系统有椭圆偏振。这是为了使RF信号发射和接收的硬件设计有效和具有成本效益。然而，系统管理方迅速发现，在大雨中，退极化严重影响了运行，并对雷达进行改良，采用线性水平偏振（Sirmans, 1993）。由于偏振是考虑对干扰敏感性的一个因素，因此，应保持目前使用线性偏振（水平和/或垂直）的能力。

4.2.9.3 最大不模糊距离和速度估算

气象雷达的频率选择也决定了最大可测量风速和最大距离的性能特性。脉冲雷达的脉冲间隔时间决定了雷达的最大不模糊距离⁵。脉冲的反射必须在下一个脉冲发出前回到接收机，否则接收到的脉冲会变得模糊。多普勒雷达系统的脉冲重复频率（PRF）决定雷达可以测量的最大不模糊距离和速度（Doviak, 1979）。设计者在设计雷达的过程中受到不模糊距离-速度产品的局限，常数表示为：

$$R_m \cdot V_m = c \frac{\lambda}{8} \quad (4-11)$$

式中：

R_m : 雷达的不模糊距离（雷达可测到的最大距离）

V_m : 雷达的不模糊速度（雷达可测量的最大速度）

c : 光速（ 3×10^8 m/s）

λ : 雷达信号波长。

⁵ 最大不模糊距离是指发送的脉冲在下一脉冲发送之前，往来自雷达的最长距离。换句话说，最大不模糊距离是雷达能量在脉冲之间往来一次并依然能够提供可靠信息的最大距离。

雷达频率设定的信号波长，是雷达设计人员可自行决定的唯一参数，旨在尽可能提高雷达测量的最大距离和最大速度。减少波长需要以频率增加的同比例，减少有效距离、有效速度测量能力，或这两者的结合。为限制模糊效应并改进距离-速度产品，现代天气雷达，尤其是C频段雷达，通常采用综合多种PRF的不同发射方案（见第4.2.4段）。

这里向磁控管、速调管和TWT等不同技术提供了赋值。后一种技术能够提供具有更宽发射频谱的短距发射脉冲。有些磁控管在广泛的常温范围内，会显现小于1 MHz的频移。由于采用脉冲压缩技术，高速扫描雷达的频谱需求巨大，可多达10 MHz。

即使在较长的S频段波长上，也很难在长距离和大速度量距上达到可接受的雷达性能。例如，美国NEXRAD计划采用了大量的减缓方法，例如在相同仰角利用不同PRF和系统相位编码进行多次扫描。在较短波长上，这些问题变得更具挑战性。

4.2.9.4 回波相干

PRF与波长之间的关系可确定对不模糊速度的限制（奈奎斯特频率）。奈奎斯特同间隔（不模糊速度范围）与波长成正比。相关方程式如下：

$$V_a = \frac{\lambda \cdot PRF}{4}$$

因此，对于已知PRF，波长可确立奈奎斯特同间隔，同样这会限制多普勒谱宽估算的准确度。当频谱宽度与奈奎斯特同间隔有很大关联时，则雷达样本在脉冲之间变得非相干，且估算准确度下降。由于湍流、切变和下落速度等诸多因素，频谱宽会增加（谱加宽），并成为频谱的大部分（Fabry, 2015, 第5.2节）。如果频谱宽度大于奈奎斯特同间隔约 $(2\pi)^{-1}$ ，则多普勒速度估算方差以指数速度增加（Doviak, 1978）。

由于湍流和切变的影响随着雷达样本体积增加而加大，因此频谱宽度随雷达有效波束宽度和范围而改变。“相干范围”可定义为最大范围，从而可获取合格质量的多普勒估值。对于给定的波束宽度，最好是较长的波长（例如10厘米，S频段）。

4.2.9.5 共振效应 – 定量强度测量

球形颗粒的有效后向散射截面尤其取决于入射信号波长以及球体直径（Rheinstein, 1968）。反射率估值是后向散射截面的计量单位，对于该反射率准确的估值，返回功率必须是雨滴粒径的线性函数。这表明，在瑞利区和米区会发生雷达后向散射，这是极非线性的，对于通常预计的雨滴直径应当加以避免（Fabry, 2015）。除了衰减之外，共振效应会对偏振变量估算产生负面影响（Zrnich, 2000）。如Zrnich所述，在5厘米波长上，对于粒径大于5毫米的雨滴会产生共振，而偏振变量会显示出非线性（非单调）特性，从而无法做出准确的定量估算。对C频段相关系数的影响十分明显，尤其是对于大于30dBz的反射率值（Ryzhkov, 2005）。

米区的雨滴直径与后向散射截面之间关系的不确定性会妨碍较短波长的可接受反射率估算。在不断衰减的波长上，雷达校准常数中的小误差会导致雨强估算的大误差（Hitschfeld, 1954）。

4.2.9.6 结论

气象雷达的频段选择涉及到所需的覆盖距离。如果需要长覆盖距离或在大雨常见的地理区域，则S频段就可能进行更高质量的基于强度的参数估算和多普勒估算。在其它地理区域或在较短距离上，C频段和X频段雷达则分别更为适用。其它主要考虑因素是由于处理准确的多普勒估算的PRF需

要较短的第一程，因此无法充分减小范围和速度模糊。其它数据准确度影响是由于共振效应（米散射与瑞利散射），导致返回功率（后向散射信号）与降水滴谱之间的非线性关系。这会妨碍准确的雨强估算并严重损害粒子识别算法。

4.2.10 天气雷达的弱点

天气雷达可通过测量发射信号从发射机到目标再回到雷达站所需时间，确定与目标（天气）之间的距离。信号传送时间是路径长度的函数，而对其测量的准确度主要取决于脉冲的上下波动时间。脉冲的前沿和后沿是返回脉冲到达时间的标志，时间越短，测量可达到的精度越高。

保持短脉冲过渡时间需要发射机和接收机在相对宽阔的频段上具有相位线性。必要带宽大致与两个脉冲过渡时间的较短一个成比例，而（通过附加滤波等方式）将发射信号的带宽缩减到必要数值以下的尝试，会降低系统的准确性。必要带宽通常会使人感到惊讶。在雷达必要带宽内接收的干扰也会使性能恶化。

必须重申的是，虽然多数无线电通信传输是指沿具有已知特性的天线之间的路径单向传送，而雷达信号必须沿路径往返行进，而途中受阻于并非以信号反射为目的的物体（雨滴、冰雹、风送尘埃）的反射。由此接收到的信号极其微弱。

尽管雷达经常使用大的发射机功率和高灵敏度的接收机，但它们面对噪声和干扰仍显得极其脆弱。

4.2.10.1 可能出现的多类干扰

天气雷达准确描述当前大气状况的能力，可能会因为不同形式的干扰而下降，干扰不仅能够限制甚至在最坏的情况下彻底剥夺雷达检测不同高度的风速和风向、提供关于雨强和累积的相关量化、定位和跟踪飓风、台风、龙卷风、大风及其它与暴雨相关的天气现象的能力。由于雷达的敏感性，干扰信号可能极大幅度降低天气雷达的性能，为此，必须确定可劣化雷达运行能力的干扰类型。

恒定、时变和脉冲型侵入信号，是天气雷达可能经历的主要类型的干扰。一旦发现这类干扰，人们就可以在气象雷达系统预报能力受到损害之前，确定其可以承受的最大干扰程度。

在ITU-R建议M.1849-1可以查询到气象雷达使用的保护标准，作为恒定干扰的最大 $I/N = -10$ dB。

4.2.10.2 恒定干扰的影响

4.2.10.2.1 地域覆盖

持续干扰会由于噪声的相应提高，缩小雷达的业务距离，使地域覆盖受到限制。

保护标准 $I/N = -10$ dB相当于噪声或能量增加0.5 dB。

要校准雷达，以便符合接收器噪声水平（即大约 -113 dBm），且在100 km时反射率水平为0 dBz，根据这一原则，噪声的增加会改变雷达的标称条件，缩小其业务距离。

当前典型的C频段气象雷达覆盖可达大约200公里。表4-3归纳了距离和覆盖的损失与干扰和噪声增加的对比。

表 4-3

探测距离和覆盖的损失

噪声增加 (dB)	相应的 I/N (dB)	覆盖的损失 (km)	覆盖的损失 (相对于表面的%)
0.5	-10	11	11%
1	-6	22	21%
2	-2.3	42	38%
3	0	59	50%
4	1.8	75	61%
5	3.3	88	69%
6	4.7	100	75%
7	6	111	80%
8	7.3	121	84%
9	8.4	130	88%
10	9.5	137	90%

4.2.10.2.2 雨强

持续干扰会增加雷达接收的能量，从而对与各类降水（如降雨、降雪和冰雹）相关的反射率测量产生影响。表4-4对干扰（噪声）增加致使几种降水事件的比例上升的情况做了归纳。

根据§ 4.1.2所述，对应某个反射率水平（dB）的降水率可表示为：

$$z = AR^B$$

式中：

- z: 反射率
- A: 散射常数
- B: 速率乘数

和

$$z = 10 \log z \text{ (dBz)}$$

式中：

dBz: 反射率 (dB).

重排各项并求解R可得出下列方程式：

$$R_{(\text{mm/h})} = \left(\frac{10^{\left(\frac{\text{dBz}}{10} \right)}}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1.6} \right)}$$

假设恒定能量增加， C ，最终雨强为：

$$R_{(\text{mm/h})} = \left(\frac{10^{\left(\frac{\text{dBz} + C}{10} \right)}}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1.6} \right)}$$

雨强百分比增加是一个常数，用下列公式表示：

$$p(R_{(\text{mm/h})}) = 100 \times \left(10^{\left(\frac{C}{16} \right)} - 1 \right)$$

表4-4列出了多种降水类型的典型散射常数和比率乘数⁶。

表 4-4
各种降水事件的散射常数和比率乘数

变量	层状降雨	对流降雨	雪	雹
散射常数(A)	200	500	2 000	2 000
比率乘数(B)	1.6	1.5	2	1.29

表4-5归纳了若干降水事件的雨量增加百分比。

表4-5
降水率的增加

噪声增加 (dB)	相应的 I/N (dB)	层状雨强度增长 (%)	对流雨强度增长 (%)	降雪率增长 (%)	降雹率增长 (%)
0.5	-10	7.5	8.0	5.9	9.3
1	-6	15.5	16.6	12.2	19.5
2	-2.3	33.4	35.9	25.9	42.9
3	0	54.0	58.5	41.3	70.8
4	1.8	77.8	84.8	58.5	104.2
5	3.3	105.4	115.4	77.8	144.1
6	4.7	137.1	151.2	99.5	191.8
7	6	173.8	192.9	123.9	248.8
8	7.3	216.2	241.5	151.2	317
9	8.4	265.2	298.1	181.8	398.5
10	9.5	321.7	364.2	216.2	495.9

⁶ 层状雨、对流雨、雪和雹的散射常数及比率乘数都源于测量值。

这些计算结果表明，不论是雨值和降水类型，对应某个恒定能量增加的高估百分比也是恒定的，因此不能被忽视。

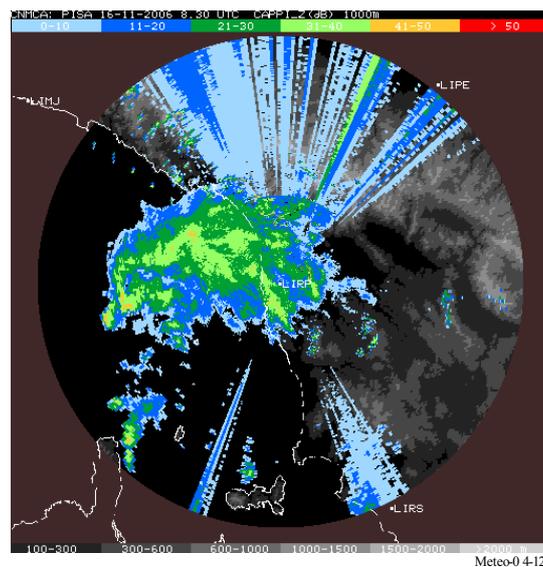
此外，考虑到对基于所有估值平均值（dBz）某个像元的反射率计算和相关的标准偏差，因此值得注意的是，干扰的增强不会改变雷达检测雨胞的能力（测量中不被视为雨胞的物质，现在依然不能被视为雨胞），却只会对降雨量造成影响。

还应当看到，无论对于覆盖面的缩小还是对于降雨量的过高估计，目前认可的-10 dB I/N 保护标准表示雷达性能出现了7-11%的下降，这相当于就所有无线电通信业务普遍达成一致的性能下降比例。

有关雷达降水模式所受持续干扰造成的影响的例子，见图4-12。必须强调指出，虽然是一种持续干扰，但影响的差异是天线旋和干扰源方位角产生的最大干扰（如本图的绿色所示）引起的。

图4-12

天气雷达降水模式所受干扰的实例



4.2.10.2.3 风测量

进行多普勒测量时，对具体持续干扰的影响作出评估颇有些困难，而这项工作尤其依赖于干扰信号相位是怎样通过改变有用信号相位，从而对得出的风测量结果造成影响的。

后一种假设显然不是无关紧要的，它将受到信号和/或环境的左右。然而有人建议，从理论的角度对不同情况加以考虑：

- 案例1 – 如果雷达发现的干扰信号的相位是随机的，这说明无论它达到什么水平，由此产生的矢量都会是统计上的零。因此，它在理论上不会对风的测量产生任何影响。
- 案例2 – 反之，如果检测出的相位非但不随机，反而近乎恒定，它将形成一个具有某种模块的恒定矢量，而且它对于风测量的影响将同时取决于上述相位和该矢量模。但是，即使对于恒定干扰电平而言，确定这种影响或许也并不容易，因此没有在此阶段进行。

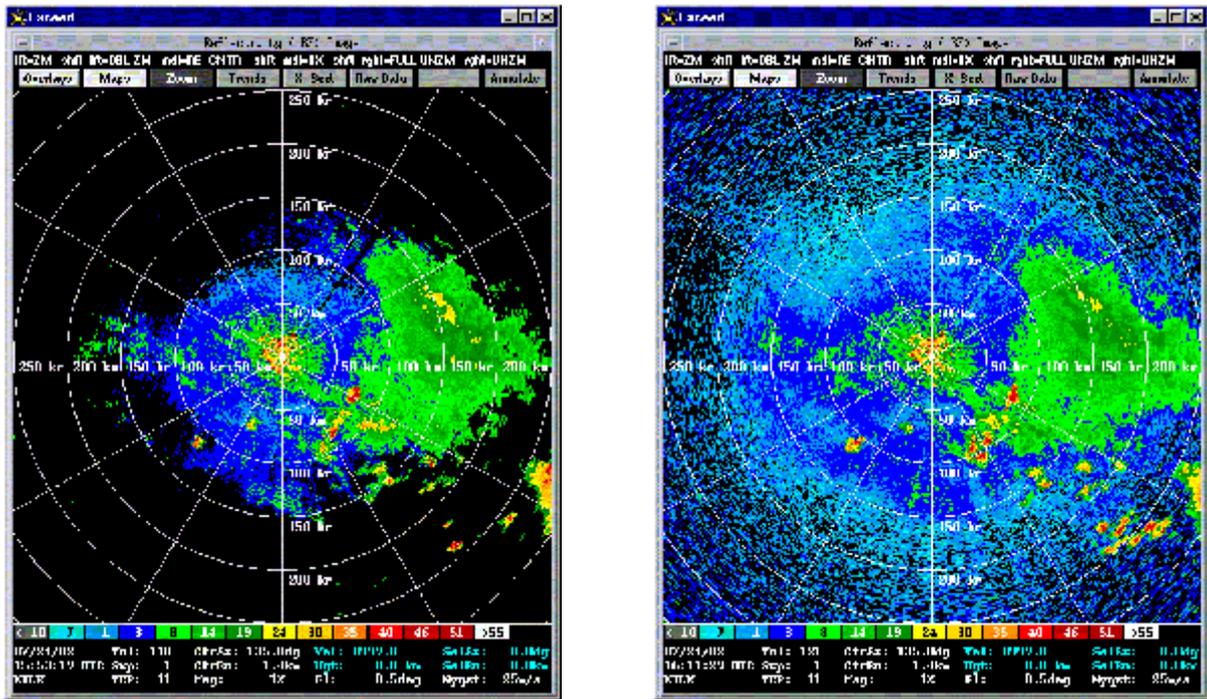
另外也可以假设，当干扰电平远低于有用信号时，对信号的相位不作修改，反之，当干扰信号远高于有用信号时，雷达检测出的相位将成为干扰信号的相位。在后一种情况下，将继续就上述案例1和2开展讨论。当情况介乎两者之间时，例如在干扰和有用信号电平保持一致的情况下，似乎很难判断哪种信号将对相位检测具有支配作用。

4.2.10.3 脉冲干扰的影响

脉冲干扰可以对反射率数据产生巨大影响，而且可致使反馈数据无法生成可靠的大气目标图像。有关这方面的实例，见图4-13。

图4-13

天气雷达降水模式的无干扰与严重干扰对比



无干扰

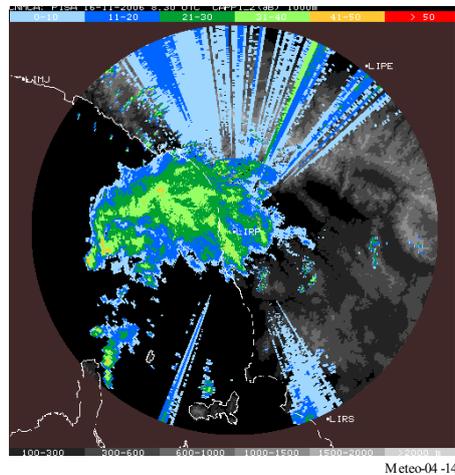
干扰破坏

Meteo-04-13

单一室内低功率发射机干扰气象雷达的另一实例参见图4-14。

图4-14

对气象雷达（降水模式）的干扰



4.2.10.4 来自风电场的干扰

近年来安装的风力发电机组越来越大。典型发电设施（或风电场包括许多风力涡轮）的数量显著增加。即使距离很远，风力涡轮发电机和风电场也极有可能使一大片区域内的气象数据质量下降，而且确实会对天气现报和预报产生不可忽视的影响。

为实现准确的天气预报，天气雷达在设计上拥有观察相对狭窄高度范围的能力。由于雷达的敏感性，在天气雷达设施的视距内部署的风力发电机组会阻碍雷达信号向前传播，导致反射率杂波返回，并产生尾流湍流引起的雷达回波。这些干扰机制可导致错误的雷达降水累积估值、错误的龙卷信号和中循环信号、错判雷暴特征以及错误的风暴单体识别。此外，此类干扰机制还可导致雷达性能降低，并对预报和预警业务产生不利影响。有三种机制会降低其性能：屏蔽、杂波和后向散射。

4.2.10.4.1 屏蔽

任何位于雷达和目标之间的地理特征和结构，都会造成遮蔽或屏蔽效应。风力发电机组有可能视其规模大小，产生掩蔽效应。这种效应可能会随发电机组的规格、发射雷达的类型以及与之相关的涡轮方面（高度、叶片角度、旋转速度以及涡轮与雷达的相对位置）。

4.2.10.4.2 杂波

从所有雷达的反射表面都可接收到雷达回波。在某些地域或具体气象条件下，雷达性能可能受到无用回波的不利影响，一些重要回波可能受到屏蔽。对于天气预报台站而言，天气雷达附近的一组或多组涡轮发电机组可能给运行带来困难。

地面杂波显示了高反射率、接近零的多普勒位移和小频谱宽度，并一直呈局部性。与常见的地面杂波（GC）相比，风力发电机组所致干扰是一种远棘手得多的挑战。从塔架（固定）和叶片（非固定）接收到的为直接反射。与地面杂波相同，风力发电机组杂波（WTC）信号的反射率会依然很高，并可能由于叶片旋转造成雷达界面系统变异而需要进行调制。

多普勒位移可能受到若干因素的影响，其中包括叶片转速和相对于雷达波束的叶片朝向。当叶片的指向脱离雷达视距90度以及当它以接近零度角背向或朝向雷达时，多普勒速度应达到最大极限。由于雷达的分辨率体可能包括整个风力发电机组结构，频谱宽度可望大幅度提高。这是因为叶片背向或朝向雷达旋转。一个分辨率体内的多个发电机组只会加剧这一效应。

4.2.10.4.3 来自湍流涡旋的后向散射能

除现有风力发电机组反射造成的WTC信号外，还可以观察到随风电场而来的湍流涡旋产生的后向散射能。人们希望，这些回波显示的特性类似于雷达的布拉格尺度折射率不均匀性带来的后向散射特性。尾流回波会随风场漂移，与发电机的直接反射相比，其反射率要低得多。不过，它们会大幅度扩展受WTC影响的雷达覆盖区，从而使问题更为严重。

4.2.10.4.4 风力涡轮发电机组杂波实例

图4-15[Palmer和Isom，2006年]提供了两个迥然不同的风电场⁷干扰实例。正如所料，反射率显示出近45 dBZ的高数值，并不时达到10 m/s以上的大频谱宽度。雷达西南部较小的高反射率区清晰可辨，与距天气雷达所在地大约45公里的风电场相吻合。

图4-15

晴空条件下风电场对天气雷达干扰实例

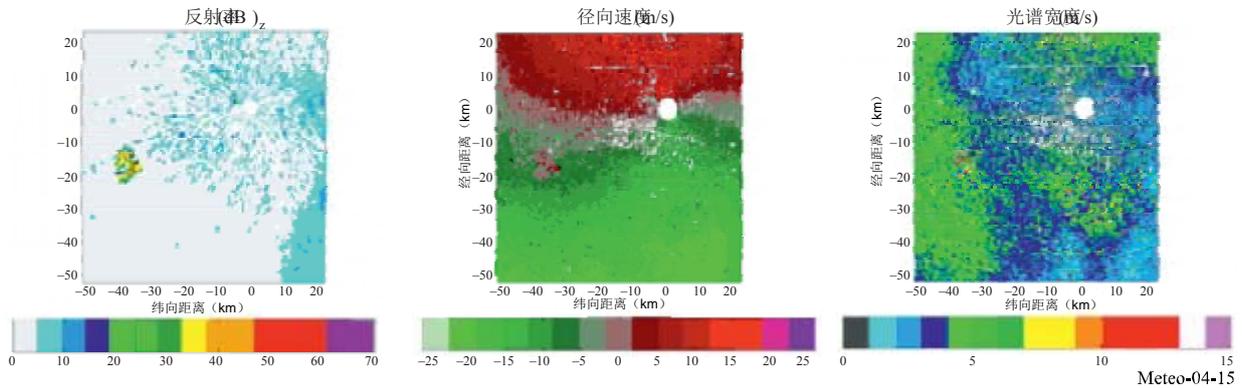


图4-16显示了雷暴过程中的同一个风电场。

⁷ 风电场是集中安装发电用风力发电机组的地方。

需要某种WTC缓解方法来保护气象雷达免受风电场的有害干扰。在就缓解WTC的处理方法作出任何最后结论之前，需要对WTC开展进一步研究，以充分了解WTC对气象雷达的影响程度。确定这一影响程度后，可能需要根据风力发电系统增长的前景，制定出缓解WTC的方法。

在进行中的缓解WTC对气象雷达干扰的研究产生结果之前，避免或限制风电场影响的现行解决方案是保证两个系统的间距。例如，一些欧洲国家正在考虑采用以下建议：

- 1) 部署的风力发电机组与雷达天线不得小于以下距离：
 - 距C频段雷达5公里
 - 距S频段雷达10公里
- 2) 当风电场项目设在以下距离以内时，应对其造成的影响进行研究：
 - 距C频段雷达20公里
 - 距S频段雷达30公里。

4.2.11 与天气雷达共用频谱的系统的弱点

如上所述，天气雷达的发射机功率和天线增益通常很高，作为对长路径的补偿（峰值e.i.r.p.约为100 dBW）。这些特性往往会扩大同频（充分认识到雷达信道的宽度）系统受雷达干扰的范围。还有一种情况是，由于微波系统从模拟向数字设备升级，在一段时间内共存的雷达和固定微波链路出现了不兼容现象，而且微波系统更易于受到脉冲干扰的影响。

4.2.12 未来趋势

各管理部门气象雷达系统的主要硬件升级工作正在进行中。不断的升级换代包括启用偏振雷达，这可对目前使用的水平雷达波添加垂直偏振。自2016年起，美国所有的NEXRAD雷达以及欧洲约一半的OPERA雷达均已升级到双偏振。

其它可进一步提高气象雷达性能的技术也在进行中。其中最主要的是用于解决距离/速度模糊、提高数据获取速度、降低后生现象影响、减少杂波以及有效处理信号的各种算法，以提供尽量准确的气象估值。其它努力包括鉴于一些无线电频段具有可促进大气和地球进行空基被动遥感的特有属性和自然辐射，这些频段已成为独特的自然资源，因而应适当分配给地球探测卫星服务（被动）和应当进行绝对保护免受干扰；综合使用天气雷达和廓线雷达。应适度努力研究闪电及其危害，以确定是否能够预测闪电的开始和结束。

研究人员采用了相控阵雷达技术用于天气监视应用。相控阵将采用电子控制的阵列天线取代机械控制的抛物面碟形天线。这种改变将能够实行更灵活的扫描策略，更快速地更新不断变化的天气条件。对相控阵雷达系统进行的初步测试已证明前景广阔。相控阵技术将促进对风暴发展的根本了解，同样也会带来完善的计算机模式、更准确的预报及更早的预警。此外，该技术有可能提高对龙卷风预警的平均提前时间，大大高于目前的平均13分钟提前时间。通过改进接收器和信号处理子系统，从而更经济地实施系统强化。相控阵升级（如果实施）有可能将不会重新使用现有的发射机，代之以相控阵的分布式发射/接收模块。一些地区已讨论了相控阵气象雷达的实施可能性。

目前确实有可能部署基于CASA（大气协作自适应遥感中心）的频谱在8 000 MHz - 12 000 MHz部分内的X频段天气雷达系统。2003年9月，美国国家科学基金会建立了一个新的大气协作自适应遥感工程研究中心（CASA），旨在开发小型、低成本雷达，用于对低层大气开展高分辨率遥感。对流层下部气象条件的采样严重不足，阻碍了风暴发展地区的预报和模式初始化。高空间密度CASA雷达

有可能探测通常在现有业务多普勒雷达覆盖范围以下的低层大气区域（最下方3千米）不断变化的天气形势。CASA雷达将安装于移动电话塔上或其它具备大量数据传输能力的现有基础设施上。不同于目前预定程序雷达网，CASA协作雷达将互相联系，并适应其遥感策略，以直接响应不断变化的天气和终端用户需求。这些雷达数据可被纳入数值天气预报模式，以便进行更完整的数据初始化。

最后还应注意美国的SENSR项目，它是将天气和ATC雷达（一次和二次雷达）合并为一个雷达硬件（一种通用方法）。

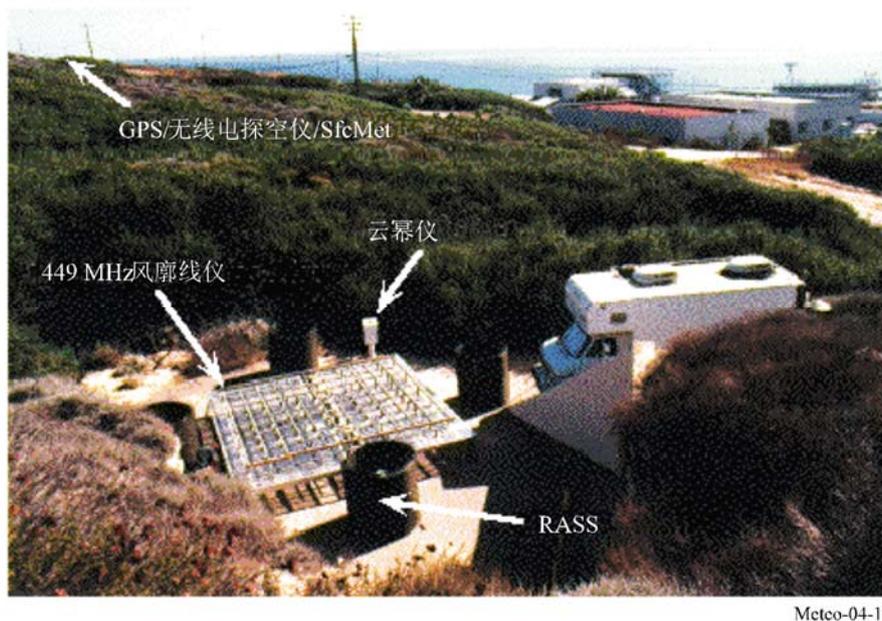
这些未来趋势需要加以跟踪，而随着技术的发展，将会对所有未来的干扰减缓战略和保护标准定义产生影响。

4.3 风廓线雷达（WPR）

通过探测晴空中涡旋后向散射的微量发射功率，风廓线雷达被用于检测风在人烟稀少或在某些情况下偏远地区的垂直分布。图 4-18显示了一张典型的风廓线雷达设施的图片。

图4-18

风廓线仪安装图



风廓线系统较其它风测量系统的一大优势是，它能够对风场进行持续监测，也可以用于检测降水、测量垂直速度场的主要特征（重力波和对流系统）、估算紊流度和测量大气稳定性，还可以通过加装无线电音响探测系统（RASS）⁸，提供有关大气虚温垂直廓线的详细信息。

⁸ RASS采用频率相同的声源，使声波的波长与雷达发射的电磁波中的一半声波相吻合（布拉格条件）。RASS测量受温度左右的声波速度，以此提供大气虚温度的远程测量结果。

4.3.1 用户要求

研究用户要求对风廓线操作参数和设计影响的便捷途径，是考虑采用下列根据[Gossard和Strauch, 1983年]的简化公式：

$$SNR = \text{const} \frac{\bar{P}_t A_e \Delta_z \lambda^{1/6} t_{obs}^{1/2}}{T_{sys}} \frac{C_n^2}{z^2} \quad (4-12)$$

式中：

- \bar{P}_t : 平均发射功率（瓦）
- A_e : 有效孔径（度）
- Δ_z : 高度分辨率（米）
- z : 高度（米）
- λ : 波长（米）
- t_{obs} : 观测（平均）次数
- T_{sys} : 系统噪声温度（K）
- C_n^2 : 结构参数（无量纲）。

该方程仅适用于大气湍流惯性子区。实际上，大气湍流结构在物理上将适用的风廓线仪雷达波长距离限制在约10-0.2米（30 - 1 500 MHz）。在惯性子区下限之下，对热量的黏性会快速消散湍流。为此，较短波长无法用于风廓线，因为缺少极小尺度可测量的折射率起伏。

折射率结构参数与以惯性子区范围为界的相关布拉格波长范围内的频率无关，但对高度有密切的依存关系。其余的频率依赖关系主要包含在波长因素之中，而系统噪声温度很大一部分是来自大于1米波长的宇宙噪声。

用户对高时间分辨率的要求，可通过缩短平均时间降低信噪比。可通过选择以下某种组合满足这一要求：

- 大孔径；
- 以高峰值功率和高脉冲重复频率（PRF）提高平均功率；
- 长波长；和
- 在高PRF不会引起测距模糊问题和大气后向散射及反高度平方较大的地方，在接近雷达的多种高度运行。

用户对高垂直分辨率的要求，可通过要求短脉冲和降低平均功率压低信噪比。高垂直分辨率需要大的带宽。可通过选择以下某种组合满足这一要求：

- 大孔径；
- 以高峰值功率和高脉冲重复频率（PRF）提高平均功率；
- 长波长；和
- 在高PRF不会引起测距模糊问题和大气后向散射及反高度平方较大的地方，在接近雷达的多种高度运行。

请注意，使用脉冲压缩（增加脉冲长度）意味着必须增加最低距门的高度。

由于反高度平方的缩小和公式没有明确显示的结构参数高度的下降，以及从短波（高频）一端利用增加高度压缩惯性负区，用户获得高空风数据的需求会降低信噪比。可通过选择以下某种组合满足这一要求：

- 大孔径；
- 以高峰值功率和脉冲压缩提高平均功率；
- 长波长；和
- 长平均时间。

当大气层存在低后向散射条件时，用户对可靠全天候运行的需求也会需要适当的信噪比。典型的情况是冬季低湿度和低紊流时段，例如在10-15公里高度急流核心。可通过以下适当选择满足这一要求：

- 频段；
- 大平均功率和天线孔径；
- 较高的接收机敏感度；和
- 低度干扰和系统噪声。

4.3.2 操作与频率问题

大天线孔径和高平均发射功率的费用昂贵。风廓线雷达的天线和功率放大器成本，往往占到装机系统总成本的一半以上。因此这些领域的技术成果，并是相当昂贵的提高性能方案。

不过就天线孔径而言，确定最小规格是需要考虑的另一因素。WPR是通过主波束至少在三个独立方向连续转动运行。目前的系统通常在大约75°仰角使用2个或4个正交方位角，而且通常达到垂直程度以获取数据。最新的天线设计有利于在波束控制方面有更强的灵活性。天线波束宽度必须足够窄，以便将多个波束位置区分开来。5°到10°的3 dB全宽度波束宽度是适用的，分别相当于33 dBi至27 dBi。增益通过以下公式（4-13）确定有效孔径：

$$A_e = 10^{G/10} \lambda^2 / 4\pi \quad (4-13)$$

由于射频频谱内的干扰和拥塞以及由此引发的监管工作，风廓线雷达频率不能自由选择。一些要求苛刻应用，例如日本和美国东西部发射场的MU雷达等，致使在50 MHz附近运行的极大型（约10 000 m²）高功率（峰值达250 kW或更高，平均达到12.5 kW或更高）短脉冲（1 μs）雷达得到采用。研究人员还在40和70 MHz 频率范围内无干扰地运行了其它风廓线雷达。

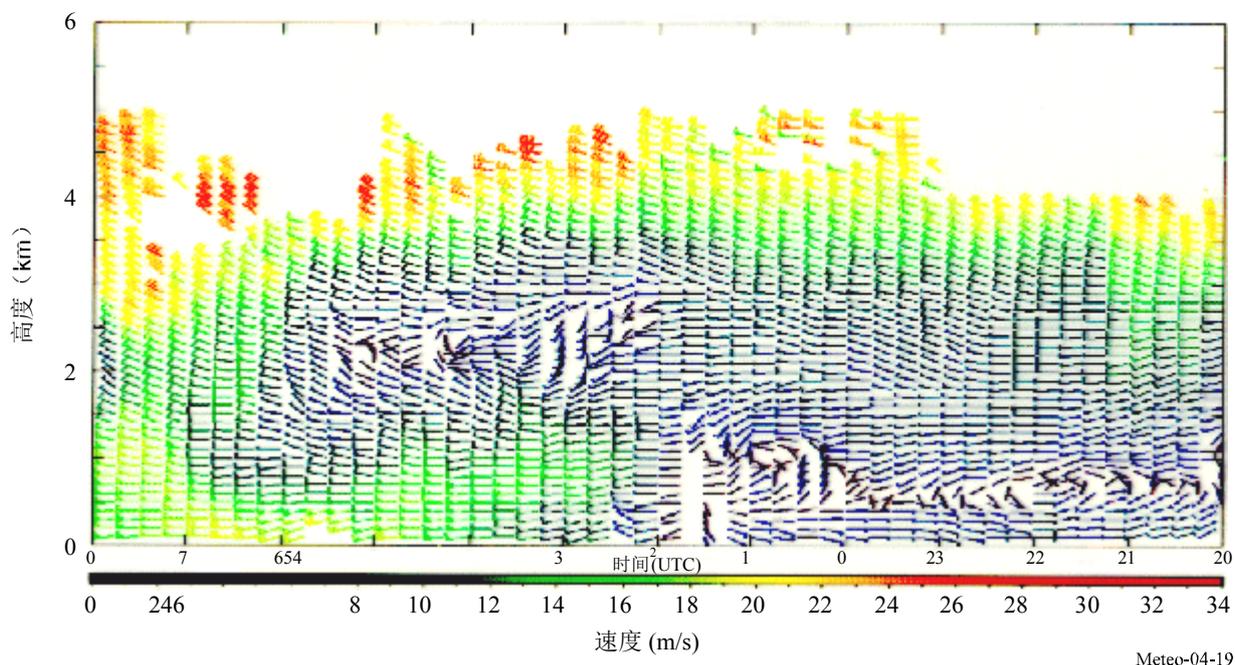
在400-500 MHz范围内运行的风廓线雷达旨在：

- 利用增益通常在32-34 dBi的天线，以低空150-250米和高空300-1 000米的垂直分辨率测量雷达上空0.5-16公里高度的风廓线；
- 在进行低空和高空探测时，分别测量500瓦和2000瓦的平均功率；
- 同时利用低于2 MHz的必要带宽运行。

增加风廓线雷达的运行频率可提高测量的分辨率，但要付出降低整体测量高度的代价。在 915 MHz 和 1 270-1 375 MHz 运行的风廓线系统通常被视为边界层系统，仅能在大气最底层几公里内测量风廓线。这些测量都是利用增益在 30 dBi 以下和平均功率在 50 W 左右的雷达，以大约 100 米的垂直分辨率进行的，并同时在约 2.5 MHz 或更高的必要带宽内运行。

例如，运行在 924 MHz 的移动风廓线系统生成了一份风速与高度曲线图（见图 4-19）。每个风羽的指向代表作为高度（纵轴）和时间（横轴）函数的风向，而其颜色代表风速。

图 4-19
风速与高度



Meteo-04-19

4.3.3 目前和未来的频谱需求

风廓线雷达是地基系统，天线高度 1 到 2 米，波束为垂直指向。地理间隔和地形屏护能够有效防护往来于其它风廓线雷达的干扰。因此，价格合理的风廓线雷达网络，如平地采用至少 50 公里间隔，而崎岖或树木覆盖地形缩短间隔，则可同频运行。基于这一原理，风廓线系统通常能够与多数地基业务相兼容。

人们普遍认为，400 MHz 附近需要 2 至 3 MHz 带宽，1 000 MHz 或 1 300 MHz 附近则需要 2.5 MHz 带宽，而且可以认为，第 217 号决议（WRC-97）的以下规定足以满足这些要求：

“... 敦促主管部门在以下频段部署作为无线电定位业务系统的风廓线雷达，同时充分注意到与提供这类业务的台站的其它业务和指配不兼容的可能性，从而充分考虑到尤其与邻国的地理间隔原则，并铭记这些业务当中每种业务的类型：

- 第 5.162A 段规定的 46-68 MHz
- 440-450 MHz

- 第5.291A段规定的470-494 MHz
- 仅用于2区的904-928 MHz
- 1 270-1 295 MHz
- 1 300-1 375 MHz; ”

“... 如遇到在440-450 MHz或470-494 MHz频段运行的风廓线雷达及其它无线电应用无法兼容的情况，可以考虑使用420-435 MHz或438-440 MHz频段；”

4.3.4 风廓线系统的共用问题

1997年世界无线电大会（WRC-97）分配给风廓线系统使用的频段是经过精心挑选的，以尽量减少这些频段其它用户可能发出或受到的干扰。在为风廓线雷达确定频段以前，在400.15-406 MHz频段建立了实验网络。运行经验表明，风廓线雷达在400.15-406 MHz频段的运行对全球卫星搜救系统（COSPAS-SARSAT）造成了干扰。

为此，第217号决议（WRC-97）确定了有待用于WPR的频谱，并明确指出，风廓线雷达不应在400.15-406 MHz频段运行。该试验网络确实提供了大量有关风廓线雷达与其它业务兼容性的信息。这些水平方向的风廓线雷达的e.i.r.p. 频谱密度约为：

- 中心频率（449 MHz）为-18 dB(W/kHz)
- 偏离0.5 MHz 为-36 dB(W/kHz)
- 偏离1 MHz 为-55dB(W/kHz)
- 偏离2 MHz为-70 dB(W/kHz)
- 偏离4 MHz为-79 dB（W/kHz）。

当这些低数值与低天线高度和与地表传播成 $1/r^4$ 比例关系的路径损耗相结合时，会使地理间隔成为极为有效的共用工具。

然而，主波束的e.i.r.p.频谱密度高出57 dB，因此，空中和基于卫星的接收机所受的干扰要强烈得多。形成 $1/r^2$ 比例关系的路径损耗，使问题更加严重。随后采取的利用400.15-406 MHz频段WPR缓解这一问题的行动表明，404 MHz WPR采用的调制方式对其共用特性具有巨大影响。目前，脉冲经过相位编码以区分每个脉冲内的2或3个单片机，从而实现脉冲压缩。若不再进行编码，发射频谱将由受PRF分割的线条组成。但是，64长伪随机相码序列被依次加之于每个脉冲，使谱线以PRF/64的间隔出现，线路功率下降到1/64。此外，每当COSPAS-SARSAT卫星出现在风廓线雷达地平线上方41度以上时（由于这类卫星数量很少，风廓线雷达丢失的数据可以忽略不计），风廓线发射机都会在计算机控制下关闭。

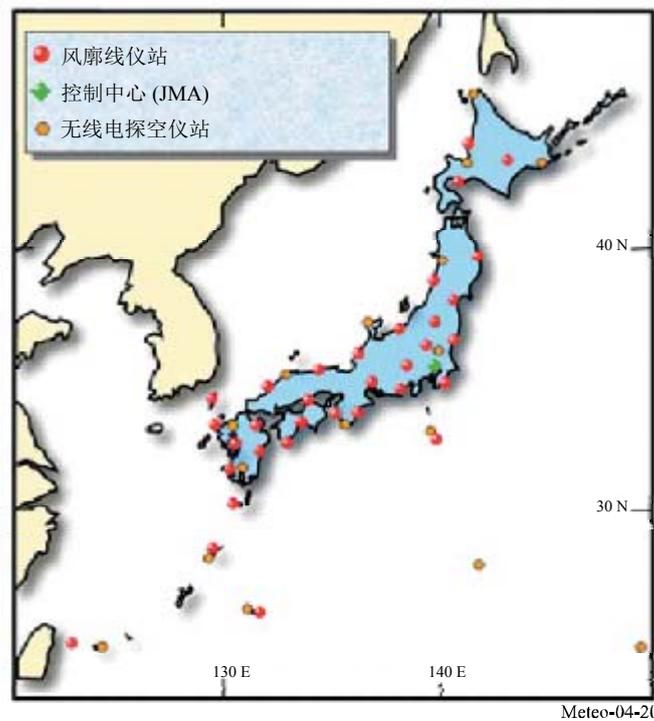
用于404 MHz风廓线发射的相位编码必须由接收机“解码”。因此，其它非WPR系统的干扰在风廓线雷达看来，是不连贯和类似噪声的。由此可见，可检测的最低（风廓线系统）信号约为-170 dBm，而干扰只有在达到-135 dBm或更高水平时才会造成麻烦。

另一个与WPR共用的例子是，2000年世界无线电通信大会将1 215-1 300 MHz频段分配给卫星无线电导航业务。自那时起进行的一系列技术研究，对在1 270-1 295 MHz频段运行的那些RNSS系统和WPR的兼容性问题做了评估。研究的结果见ECC第90号报告。这份报告的结论认为，RNSS系统在一定条件下可能干扰和劣化风廓线系统的运行，至少会使三波束WPR受到影响。该报告还列出了一系列有助于克服这些困难的缓解技术（硬件或软件），其中包括天线指向选择，增加波束或在1 274或1 294 MHz频率和RNSS调制的零位部署WPR，最后一项可能是更为简单易行的技术。

日本气象厅（JMA）正在运行一个风廓线雷达网络和数据采集系统（WINDAS），旨在监测和预测恶劣天气事件。该网络是由安装在日本全境的33个1.3 GHz风廓线系统构成的，它们与设在东京的日本气象厅总部控制中心保持联系（图4-20）。

图4-20

风廓线雷达网络实例



然后通过全球电信系统，将数据进行全球分发，还可查询JMA网站（<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>）。此外，该数据与多普勒雷达和商用飞机提供的数据相结合，以提供全面的“高空气流分析”。

第5章

用于气象活动的无源和有源航天遥感

页码

5.1	引言	72
5.2	无源微波辐射遥感	73
5.2.1	频谱要求	74
5.2.2	地球表面特征观测	77
5.2.3	性能参数	79
5.2.4	无源传感器的典型操作条件	80
5.2.5	主要技术特性	81
5.2.6	性能和干扰标准	82
5.2.7	大气参数的三维测量	82
5.3	有源传感器	90
5.3.1	引言	90
5.3.2	合成孔径雷达 (SAR)	92
5.3.3	高度计	93
5.3.4	散射计	94
5.3.5	降水雷达	96
5.3.6	云廓线雷达	97
5.3.7	传感器干扰和性能标准	98
5.3.8	功率通量密度 (pfd) 电平	98

5.1 引言

气象卫星的存在几乎是众所周知的，其生成的图像经常出现在电视、媒体和互联网上。今天，公众已对显示云层覆盖、地表温度、积雪和其他天气现象的色彩增强、用地图标注的图像习以为常，或是频率较低的显示林火及其烟幕云层、火山灰、以及由于厄尔尼诺现象而备受关注的洋面温度的卫星图像。

许多图像具有一个共同点，它们主要是由使用可见和红外光谱区的传感器记录的数据产生的。但其中许多产品其他产品是通过使用各微波频率独立或连同其他频率测量产生的。

因此，地球表面和大气层的射频（从VHF到微波直至高光谱区）航天遥感对业务和研究气象（特别是对减轻天气和气候相关的灾害影响）以及对气候变化及其影响的科学认识、监测和预测方面关键且日益重要的作用并非人所共知。

近年来在天气和气候分析及预测方面（包括对影响人类和经济的危险天气现象（大雨、暴雨、龙卷风）预警）取得的骄人成绩在很大程度上源于空间观测及其数值模式同化的资料。

欧洲近期的研究证实，Metop卫星装载了若干个不同的遥感器（无源和有源）大大提升了数值天气预报（NWP）的性能，通过各种模式实时获取所有观测资料可减少24小时预报误差的25%。因为大大减少了预报误差，天气预报每年可带来较高的社会效益（估计欧盟每年为614亿欧元），其中很大一部分可归功于Metop卫星，每年可达49亿欧元。

广泛应用的航天遥感有两类 – **无源**和**有源**，目前仅在非GSO卫星上的卫星地球探测业务（EESS）中操作。

无源遥感仅使用接收机，不涉及发射机。这些接收机所获取的辐射是自然产生的，通常功率电平较低，包含所调查的物理过程的基本信息。其中重要的信息包括说明存在特定化学物质的辐射峰值，或缺少特定频率，表明大气气体吸收了频率信号。特定频率上的信号强度或缺失用来确定是否存在特定气体（常见的如水分和污染物），如存在，数量多少，位置如何。可通过在一些频段运行的无源传感器监测各种环境信息，这些频段只能通过被探测物质固定的物理特性（分子辐射共振或吸收）进行确定，而其物理性质不能在其它频段中复制。某一特定频率上的信号强度可能取决于几个变量，利用几个必需频率去匹配多个未知频率。使用多频率是测量大气层和地表各种特性的主要技术。

有源遥感不同于无源遥感，它同时涉及星载发射机和接收机。通常由同一颗卫星发射信号并接受反射信号，但是通常不是这种情况。有源遥感的用途包括但不限于测量洋面特性，如浪高和风速，以及确定雨林中的树木密度。

两类遥感的兼容性问题涉及与其他空间业务相关的相同问题：卫星接收机和其他射频发射电台（地面或空间）之间相互的干扰。解决这些问题的方法是众所周知，通常有关与其他用户在功率限制、天线特性、时间和频率共用基础上进行的协调。

无源遥感卫星，特别是有较大区域测量采样的无源遥感卫星特有的脆弱性源于每种测量可受到多个地面发射器（带内和带外）累积辐射的影响。因此，虽然一个地面发射器的辐射功率不足以造成无源传感测量结果出现误差，大量的发射器通过这些干扰信号聚合可能对正在进行的测量造成损害。来自多个发射器的干扰聚合也引起了人们对高密度固定业务（HDFS）发射、超宽带（UWB）应用和短距离设备（SRD）或工业、科学和医疗（ISM）设备的关注。造成这一潜在问题的原因是测量区域内的这些发射器的空间密度及其单个特性。随着此类地面有源设备密度的增大，这种情况变得越来越严重了，有害干扰的情况已有报告。

几个地球物理参数在不同程度上导致了这具体参数的自然发射，可在给定频率上进行观测。因此，必须在微波频谱的几个频率上同时进行测量，以便离析并获取造成全部自然发射的每一个因素，并从给定的测量值中提取相关的参数。因此，对一些“无源”频段中任何一个产生影响的干扰可能会影响对在一组规定频率上获得的某个大气成分的整体测量。

对于发射机-接收机组对的情况，信号的性质和特点已是已知的，判断是否正确接收了信号是相对简单的。文献提供了无线电通信系统中处理检错与纠错的各种实用技术，但遗憾的是，在各接收信号特性不明时，这些技术毫无用处。无源遥感正是这种情况，由于其易受干扰性是由无源传感器所要接收的自然信号的不确定性和测量到的自然辐射功率电平非常低造成的，因此是独特的。

即使无源传感器所接收到的干扰电平非常低也可能会降低其数据质量，最大的威胁可能是这种干扰无法被发现，损坏的数据将被误认为是有效数据，分析这些损坏数据得出的结论将有严重的缺陷。在大多数情况下，无源传感器无法区分自然和人为辐射，往往无法检测及纠正数据错误。因此，能否保持数据的完整性取决于能否预防干扰并对干扰实行严格的限制，目前在全球范围内限制最大功率似乎是唯一的解决方案。在《无线电规则》中可发现一些条款对有源业务发射机使用了这种功率限制，以保护无源传感器免受带内或带外干扰。

近年来在研究应用中毫米波测云雷达的使用已受到广泛关注。提高对气候系统中云层作用的认识是气候变化研究的重中之重。再加上毫米波雷达技术的最新进展，这一研究需要已成为毫米波测云雷达的发展动力。目前这些雷达主要在36 GHz（Ka频段）和94 GHz（W频段）附近运行，提供气候研究人员所需要的必要定性和定量资料。毫米波雷达对少量水汽凝结的灵敏度，高空间分辨率，对地面杂波易感性最小，体积相对较小，使其成为云研究的绝佳工具，可在固定地面、移动地面、空载和星载平台运行。

5.2 无源微波辐射遥感

无源微波辐射测量是地球观测的重要的工具。在EESS下，运行无源传感器是为了接收和测量地表和大气层所产生的自然发射。这些自然发射的频率和强度表明了一些重要的地球物理大气和地表参数（陆地、海洋、冰盖）的类型和状态，这些参数描述了地球/大气/海洋系统的状态及其机制：

- 地表参数，如土壤湿度，洋面温度，海洋风应力，冰范围和冰龄，积雪，陆地降雨等；以及
- 三维大气参数（低、中、高层大气），如温度分布，水汽含量以及具有重要放射性和化学意义的微量气体（如臭氧，一氧化二氮和氯气）浓度分布。

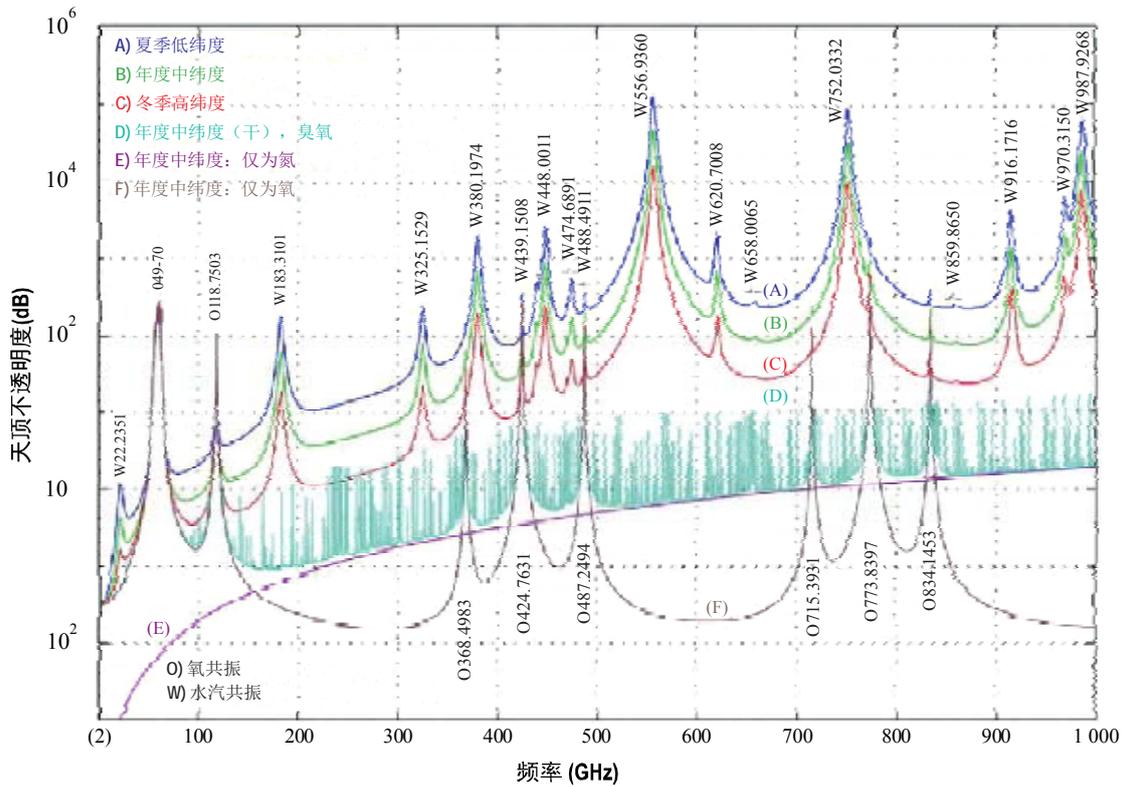
利用微波技术，即使在有云层的情况下，也能从地球轨道对地表及其大气层进行观测，云层在 100 GHz 以下频率基本上是透明。这种全天候能力对地球观测意义重大，因为通常 60% 以上的地球表面被云覆盖。除全天候能力外，无源微波测量不依赖于日光，可在一天的任何时间进行测量。无源微波遥感是一项重要工具，已广泛用于气象、气候、环境监测和调查（业务和科学应用），对此可靠的重复性全球覆盖是至关重要的。

5.2.1 频谱要求

几个地球物理参数在不同程度上导致了这些自然发射，可在给定频率上进行观测。因此，必须同时在微波频谱的几个频率上同时进行测量，以便离析并获取每一个因素。由于大气气体的分子共振，大气的吸收特性（如图 5-1 所示）是通过吸收峰值以及通过随频率显著增加的水汽连续吸收体现的。

图 5-1

由于水汽和干燥组分而造成的大气天顶透明度



Mctco-05-01

最佳无源微波遥感频率的选择在很大程度上取决于大气的特性：

- 地表参数的观测频率选定为 100 GHz 以下，此时大气层吸收是最弱的。需达到平均每倍频程一个频率；以及
- 大气参数的观测频率基本都是在 50 GHz 以上在大气气体的吸收峰值内精心挑选的。

表 5-1 中列出了在 1 000 GHz 以下的所需频率和必要带宽。100 GHz 以上的大多数频率划分含有重要大气微量化学成分的吸收线。

表 5-1

在1 000 GHz以下用于卫星无源遥感的具有重要科学意义的频段和带宽*

分配的频段 (GHz)	分配的和(所需) 带宽 (MHz) ⁽³⁾	主要测量
1.37-1.427	57	土壤湿度、盐度、洋面温度、植被指数
2.64-2.7	60	海洋盐度、土壤湿度、植被指数
4.2-4.4	200	海水表面温度
6.7-7.1	350	海水表面温度(无划分)
10.6-10.7	100	雨速率、雪水含量、冰形态、海况、海洋风速度
15.2-15.4	200	水汽、雨速率
18.6-18.8	200	雨、海况、海冰、水汽、雪、海洋风速、土壤发射率和湿度
21.2-21.4	200	水汽、云中液态水
22.21-22.5	290	水汽、云中液态水
23.6-24	400	水汽、云中液态水、相关的大气探测通道
31.3-31.8	500	海冰、水汽、溢油、云、液态水、表面温度、参考窗口为50-60 GHz范围
36-37	1 000	雨速率、雪、海冰、云
50.2-50.4	200	O ₂ (温度分布)
52.6-59.3	6 700 ⁽¹⁾	大气温度分布的参考窗口(表面温度)
86-92	6 000	云、溢油、冰、雪、雨、温度探测118 GHz附近的参考窗口
100-102	2 000	N ₂ O、NO
109.5-111.8	2 300	O ₃
114.25-116	1 750 ⁽¹⁾	CO
115.25-122.25	7 000 ⁽¹⁾	大气温度分布(O ₂ 吸收线)
148.5-151.5	3 000	N ₂ O、地表温度、云参数、温度探测参考窗口
155.5-158.5	3 000	地球和云参数
164-167	3 000	N ₂ O、云水和冰、雨、CO、ClO
174.8-191.8	17 000 ⁽¹⁾	N ₂ O, 水汽分布、O ₃
200-209	9 000 ⁽²⁾	N ₂ O、ClO、水汽、O ₃
226-231.5	5 500	云、湿度、N ₂ O (226.09 GHz) CO (230.54 GHz)、O ₃ (231.28 GHz)、参考窗口
235-238	3 000 ⁽²⁾	O ₃
250-252	2 000 ⁽²⁾	N ₂ O
275-285.4	10 400 ⁽²⁾	N ₂ O、ClO

表 5-1（完）

分配的频段 (GHz)	分配的和（所需） 带宽 (MHz) ⁽³⁾	主要测量
296-306	10 000 ⁽²⁾	温度探测翼通道、氧气、HNO ₃ 、HOCl、N ₂ O、O ₃ 、O ₁₇ O
313-355.6	42 100 ⁽²⁾	水汽分布、云 温度探测翼通道、HDO、ClO、HNO ₃ 、H ₂ O、O ₃ 、HOCl、 CH ₃ Cl、O ¹⁸ O、CO、BrO、CH ₃ CN、N ₂ O、HCN
361.2-365	3 800 ⁽²⁾	O ₃
369.2-391.2	22 000 ⁽²⁾	水汽分布、H ₂ O
397.2-399.2	2 000	水汽分布、
409-411	2 000	温度探测
416-433.46	17 460 ⁽²⁾	氧气、温度分布、O ₂
439.1-466.3	27 200	水汽分布、云、HNO ₃ 、H ₂ O、O ₃ 、N ₂ O、CO
477.75-496.75	19 000	氧气、温度分布、O ₂
497-502	5 000 ⁽²⁾	水汽分布翼通道、O ₃ 、N ₂ O、BrO
523-527	4 000 ⁽²⁾	水汽分布翼通道
538-581	43 000 ⁽²⁾	水汽分布、ClO、H ₂ O、O ₃ 、HNO ₃
611.7-629.7	18 000 ⁽²⁾	水汽分布、氧气、H ₂ O、ClO ₂ 、SO ₂ 、HNO ₃ 、BrO、CH ₃ CN、 (H ³⁷ Cl)、H ₂ O ₂ 、HOCl、O ₃ 、HO ₂ 、H ³⁵ Cl、CH ₃ Cl、O ¹⁸ O
634-654	20 000 ⁽²⁾	水汽分布翼通道、HOCl、H ₂ ¹⁸ O、SO ₂ 、ClO、HO ₂ 、BrO、 HNO ₃ 、O ₃ 、NO、N ₂ O
656.9-692 (RR5.565)	35 100 ⁽²⁾	水汽分布、云、H ₂ O、HO ₂ 、ClO、CH ₃ Cl、CO
713.4-717.4	4 000 ⁽²⁾	O ₂
729-733	4 000 ⁽²⁾	HNO ₃ 、O ¹⁸ O
750-754	4 000 ⁽²⁾	H ₂ O
771.8-775.8	4 000 ⁽²⁾	O ₂
823.15-845.15	22 000 ⁽²⁾	O ₂
850-854 (RR5.565)	4 000 ⁽²⁾	NO
857.9-861.9	4 000 ⁽²⁾	H ₂ O
866-882	16 000 ⁽²⁾	Cloud、window
905.17-927.17	22 000 ⁽²⁾	H ₂ O
951-956	5 000 ⁽²⁾	O ₂ 、NO、H ₂ O
968.31-972.31	4 000 ⁽²⁾	H ₂ O
985.9-989.9	4 000 ⁽²⁾	H ₂ O

* 注 – 对于现有的无源传感器频率划分信息，请读者参考《无线电规则》第5条中的《频率划分表》。如需有关无源遥感首选频率的详细信息，请读者参阅ITU-R RS.515建议书的最新版本。

(1) 该带宽由多个通道占用。

(2) 该带宽由多个传感器占用。

5.2.2 地球表面特征观测

对于地表参数（例如，水汽，海面温度，风速，降水率等）的测量，必须选择所谓的辐射“窗区”通道，以便进行1 GHz至90 GHz微波频谱的常规取样（平均一频/倍频程）。但由于地表参数自然发射的频变性不强，因而一般不要求高精度的频率设定。一般而言，几个地球物理参数在不同程度上导致了这些自然发射，可在给定频率上进行观测。图5-2和5-3说明了这一点，体现了自然微波发射对各种频变地球物理参数的灵敏度。亮度温度是对一个物体热发射辐射强度的衡量，由于所发射的辐射强度与辐射体的物理温度相关联，因此用温度单位表示。

5.2.2.1 洋面观测

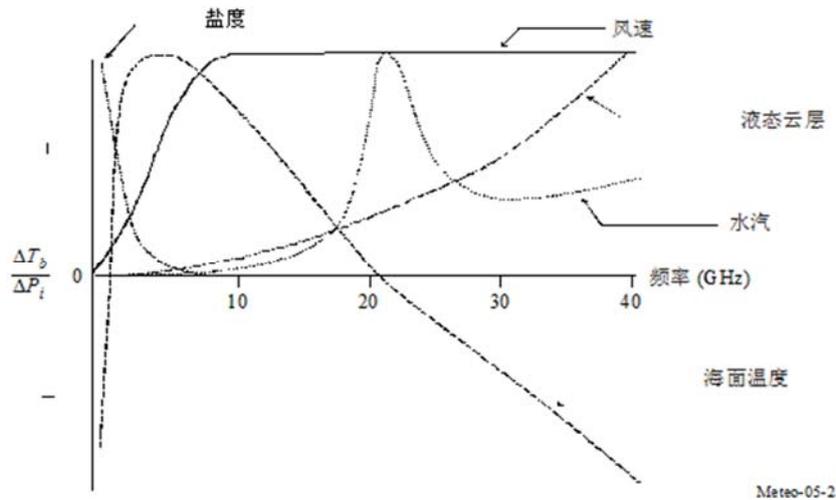
洋面遥感用于测量许多与陆地测量相同的参数（如，水汽，降水率，风速），并提供说明海洋本身情况的参数（如，海面温度，海水盐度，海冰厚度等）。

图5-2说明了洋面上亮度温度对地球物理参数的敏感性：

- 在低频，通常在1.4 GHz附近测量得知海水盐度；
- 在6 GHz周围进行的测量对海洋表面温度的敏感性最强，盐度和风速对此有少量影响，但可用1.4 GHz和10 GHz附近进行的测量消除此影响；
- 在17-19 GHz范围，海面温度和大气水汽的相差最小，因而最适合测量洋面发射率，该发射率与近洋面的风速或存在的海冰直接相关。海水表面温度对水汽总含量和液态云层也有一定的敏感性；
- 在24 GHz附近最适合测量水汽总含量，而液态云层情况则在36 GHz附近进行测量；以及
- 五个频率（6 GHz、10 GHz、18 GHz、24 GHz和36 GHz附近）对确定主要参数是必要的。

图5-2

洋面上亮度温度对地球物理参数的敏感性



5.2.2.2 陆面观测

由于地表特性的时空易变性（从雪/冰覆盖地区到沙漠和热带雨林），陆面遥感是比较复杂的。此外，无源传感器所收到的信号通过一系列不同的媒质进行传播：基本上是土壤，也许还有雪和/或冰，植被层，大气层和云层，有时还有雨或雪。需考虑的第二个因素是对于每一种媒质，可能有若干因素会影响发射辐射。例如，根据实际土壤温度、土壤含水量、表面粗糙度、土壤质地，土壤将有不同的亮度温度。同样，通过不透明性和单次散射反照率（即反射到入射光的比率），植被因素将与冠层温度和结构联系起来。这些因素影响信号的方式取决于频率。图5-3描述了几个关键参数的规范化敏感性频率函数。

图5-3表明在陆地上以及平均温带地区，需能够：

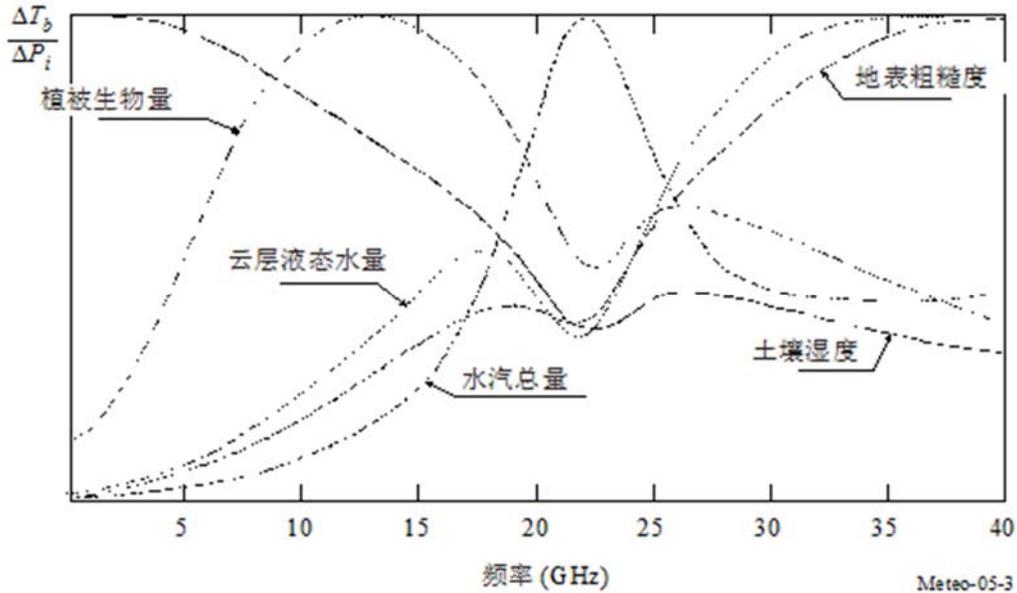
- 使用低频测量土壤湿度（1 GHz附近）；
- 在5 GHz至10 GHz附近进行测量，在得知土壤湿度影响后估算植被生物量；
- 使用水汽吸收峰值附近的两个频率（通常为18-19 GHz和23-24 GHz）评估大气影响；
- 使用37 GHz附近频率评估云中液态水（配合使用18 GHz），和/或植被结构（10 GHz），地表粗糙度（1 GHz和5 GHz或10 GHz）。

85 GHz或90 GHz的频率有助于雨量监测，但前提是所有其它的影响因素均可使用较低频率进行评估。

利用多通道扫描微波辐射计（SMMR）和特殊感应微波成像仪（SSM/I）进行的研究表明，还可以获取若干其它变量。其中包括可估算地表和大气影响时使用19 GHz附近通道得到的地表温度（比红外测量的精确度差，但具全天候能力）。

积雪覆盖区是重要的监测区，拥有几个用于测量的频率也是重要的。在实际中，须区分雪和冰以及雪的新鲜度。相关信号与积雪层结构和晶体大小相关。研究表明，为获取这些信号需使用多个频率，通常为19 GHz、37 GHz和85-90 GHz。

图5-3
陆地上亮度温度对地球物理参数的敏感性



5.2.2.3 其它遥感仪器的辅助参数

目前星载雷达测高仪目前在全球范围内在海洋和陆地表面之上运行，在海洋学和气象学中发挥着重要作用（见第5.2.3段）。为了消除大气层的折射影响，使用在13.5 GHz获得的高精度测高数据时要求在18.7 GHz、24 GHz和36 GHz附近进行辅助无源测量。

为区分卫星测得的影响信号的不同因素，有必要在至少五个频率上同时进行测量。

5.2.3 性能参数

无源传感器的特性体现在辐射灵敏度和几何分辨率上。

5.2.3.1 辐射灵敏度

此参数一般表示为传感器能够探测到的最小温差 ΔT_e 。 ΔT_e 由下列公式给出：

$$\Delta T_e = \frac{\alpha T_s}{\sqrt{B\tau}} \quad \text{K} \quad (5-1)$$

其中：

- B: 接收机带宽 (Hz)
- τ : 积分时间 (s)
- α : 接收机系统常数（取决于配置）
- T_s : 接收机系统噪声温度 (K)。

5.2.3.2 辐射门限值 ΔP

这是无源传感器能够探测到的最小功率变化。 ΔP 表示为：

$$\Delta P = k\Delta T_e B \quad \text{W} \quad (5-2)$$

其中：

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ (J/K): 波尔兹曼常数。}$$

上述 ΔP 是使用 ΔT_e 计算的并可用于确定在不降低测量情况下传感器可允许的最大容许干扰。在未来， T_S 和 ΔT_e 将会下降（见公式（5-1））。因此，为了保护未来的无源传感器操作，应使用能合理预见的 ΔT_e 而非目前技术可以达到的 ΔT_e 计算 ΔP 。同样，随着遥感技术的进一步发展（如所谓的“推扫”概念），积分时间也可能会增加。因此，积分时间的选择也必须基于未来合理的期望值。

5.2.3.3 几何分辨率

普遍认为，在地表参数的二维测量中，天线的-3 dB孔径决定了横向分辨率。在大气参数的三维测量中还必须考虑沿天线轴的纵向分辨率。纵向分辨率是有关大气层频变特性和接收机噪声带宽性能的一个复杂的函数。

5.2.3.4 积分时间

辐射接收机检测天线收集到的类似噪声的热发射和接收机的热噪声。通过对所接收到信号的积分，可减少不规则的噪声波动，并对接收机噪声和外部热发射噪声功率之和进行准确估算。积分时间仅仅是接收机整合接收到的信号所用的时间。积分时间也是无源遥感的一个重要参数，是根据所需几何分辨率、传感器扫描配置及其对于所观测事件的速度等综合权衡的结果。

5.2.4 无源传感器的典型操作条件

无源星载传感器主要部署在两个相辅相成的卫星系统类型中：低轨卫星和对地静止卫星。

5.2.4.1 低轨卫星

基于低轨、太阳同步轨道（即卫星在同一当地太阳时经过地球表面以上任何特定点的轨道）、极轨卫星的系统用于在全球范围内获取高分辨率的环境数据。这些轨道的性质限制了测量的重复率。一颗卫星每天最多实现两次全球覆盖，间隔为12小时。在100 GHz以下频率运行的无源辐射计目前只在低轨卫星操作。这主要是因为难以从较高轨道在相对较低的频率上获得必要的几何分辨率，但是，这一情况在未来可能会有所改变。

5.2.4.2 对地静止卫星

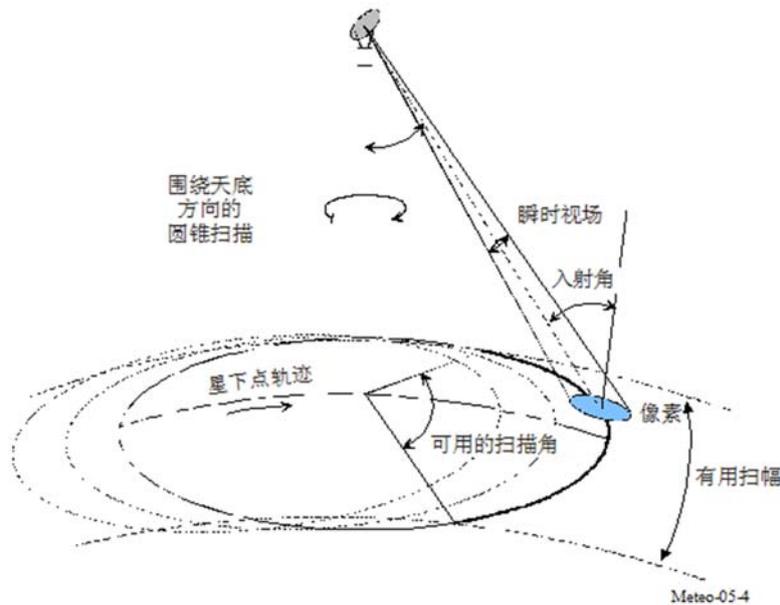
涉及对地静止轨道卫星的系统用于在区域范围收集低至中分辨率数据。测量重复率仅受硬件技术限制。一般来说，各地区数据的收集频率约为30分钟一次。

5.2.5 主要技术特性

用于地球表面特征成像的大多数无源微波传感器使用以天底（即卫星垂直向下的点）方向为中心的圆锥扫描配置（见图5-4），因为对地表测量的分析必须保持沿整个扫描线的地面入射角恒定。圆锥扫描仪器的布局见图5-4。

图5-4

圆锥扫描无源微波辐射计的典型布局



以下是典型的几何特性（高度为803公里）：

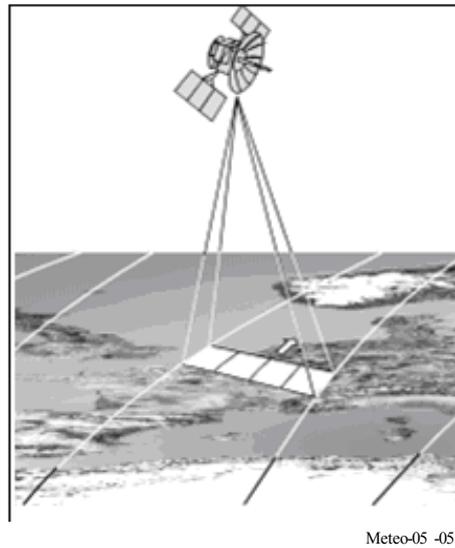
- 地面入射角约 55°
- 与天底方向的半锥角为 46.7°
- 扫宽：1 600公里（受到扫描配置的限制），一个仪器每天实现两次中高纬度的完全覆盖
- 像素尺寸随频率和天线尺寸而变化，通常从6.9 GHz的50公里到89 GHz的5公里（基于2米的有效天线直径）以及
- 选择扫描周期和天线馈源安排，简化硬件，确保在进行测量的所有频率上的全面覆盖和最佳的积分时间（从而获得最佳）。

由于消除了雷达测高仪测量的大气影响，非扫描底视仪器还可用于为特定应用提供辅助数据。为促进其适应星载环境，正在开发干涉测量技术，以提高在较低频率的空间分辨率。这些传感器将使用小型固定阵列天线而非大型扫描天线。

“推扫式”（沿轨迹）传感器是一种由与航空器飞行方向垂直排列的一行传感器组成的传感器系统，如图5-5所示。航空器飞行时对地表的不同地区进行探测。推扫式辐射计是完全静止的仪器，没有任何移动部件。推扫式辐射计的主要特点是扫描线上的所有像素是同时获得的，并非机械扫描传感器的陆续获取像素，大大提高了这种传感器的辐射分辨率。推扫式传感器可用于多种应用，包括大气温度分布、土壤湿度和海水盐度的测量。

图5-5

推扫式无源微波辐射计的典型布局



5.2.6 性能和干扰标准

EESS中运行的星载无源传感器的性能和干扰标准分别见ITU-R RS.2017建议书。

5.2.7 大气参数的三维测量

电磁频谱包含许多频段，其中由于分子共振，产生了某些大气气体的吸收机制（见图5-1）。有此类现象发生的频率体现了气体（如O₂、O₃、H₂O、ClO等）的特性。吸收系数取决于气体的性质、其浓度和温度。可通过星载平台在这些频率附近进行综合无源测量，以获取吸收气体的温度和/或浓度情况。50 GHz和70 GHz之间及118.75 GHz的氧分子共振频率以及183.31 GHz的水汽分子共振频率对于在200 GHz以下运行的无源遥感具有特别重要的意义。

波长为 λ 的吸收气体辐射的能量（在同一频率）与其温度 T 和吸收率 $\alpha = f(\lambda)$ 成比例。公式（5-3）中的关系适用：

$$I = \alpha \cdot L \quad (5-3)$$

其中：

I : 气体在温度 T 时的光谱亮度

$L = 2 \cdot k \cdot T \lambda^2$: 黑体在 T (W/(m² · sr · Hz))时的光谱亮度

$k = 1.38 \times 10^{-23}$: 波尔兹曼常数 (J/K)

α : 描述气体（O₂、CO₂、H₂O、O₃等）特性。

CO₂和O₂这两种大气气体在气象无源遥感中发挥着主要作用，因为它们在大气中的浓度和压强（确定吸收率 α 的两个参数）在全球范围几乎是恒定和已知的。因此，通过适当吸收频段（对CO₂而言，通常为红外区15 μ m附近；对O₂，为微波区60 GHz和118.75 GHz附近）的各频率上进行的辐射测量获取大气温度分布是有可能的。

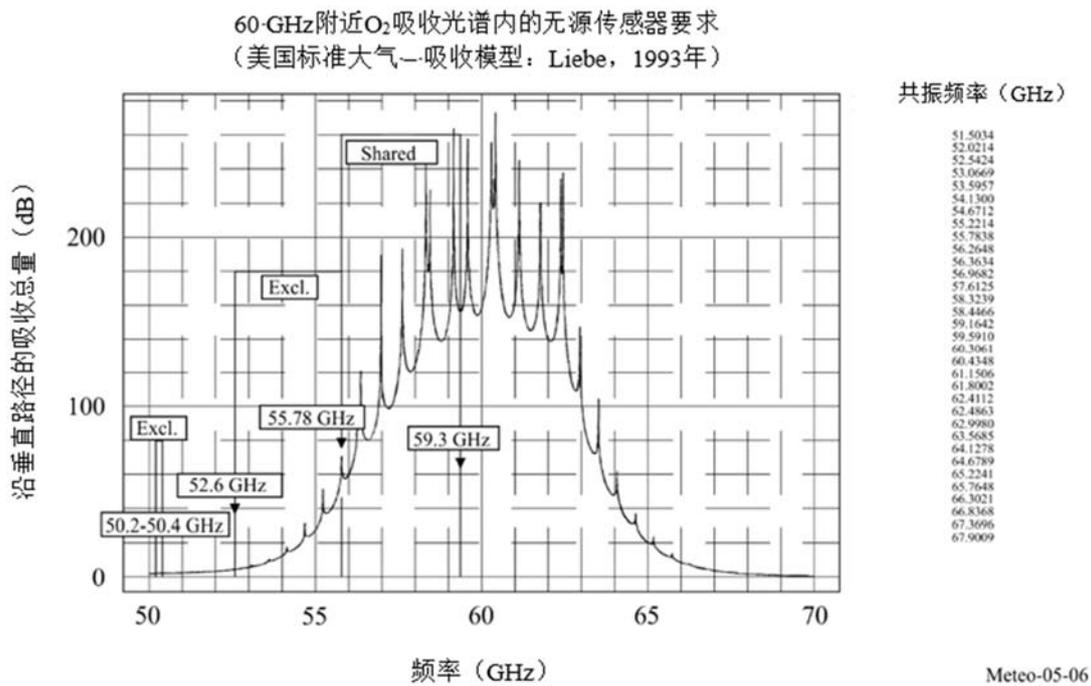
另外还在特定吸收带对其它具有重要发射性和化学意义、浓度可变且未知的大气气体（H₂O、O₃、CH₄、ClO等）进行辐射测量。但在这种情况下，必须了解大气温度分布，以便获取这些气体未知的纵向浓度分布。

5.2.7.1 无源微波大气垂直探测仪

大气探测是对大气气柱物理特性（如压强、温度、风速、风向、液态水含量、臭氧浓度、污染和其他特性）垂直分布的测量。垂直大气探测仪（即进行大气探测测量的仪器）是底视传感器，主要用于获取垂直大气温度和湿度分布。它们所使用的通道是在大气O₂和H₂O的吸收光谱内精心挑选的。200 GHz以下主要共振频率附近的详细的吸收光谱见图5-6至5-8。注意183 GHz附近水汽吸收光谱根据气候带和当地的气候条件非常重要的变化情况。

图 5-6

60 GHz附近沿垂直路径的O₂吸收光谱
(多吸收线)



注 - 图5-6还描述了50和60 GHz（50.2-50.4 GHz（专用）、52.6-55.78 GHz（专用）和55.78-59.3 GHz（共用）之间的位置及EESS划分和地位。

图 5-7

118.75 GHz附近沿垂直路径的O₂吸收光谱
(唯一吸收线)

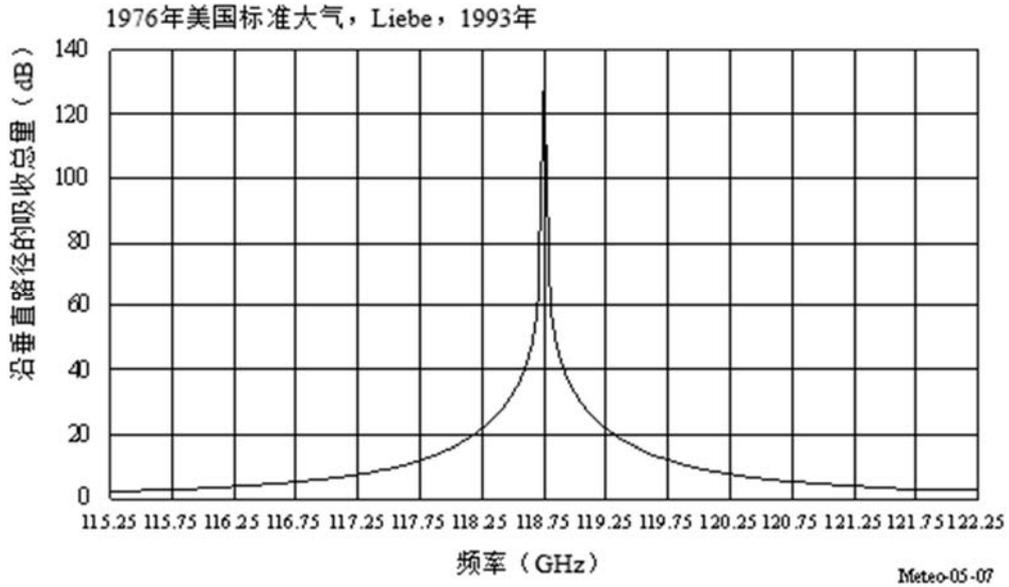
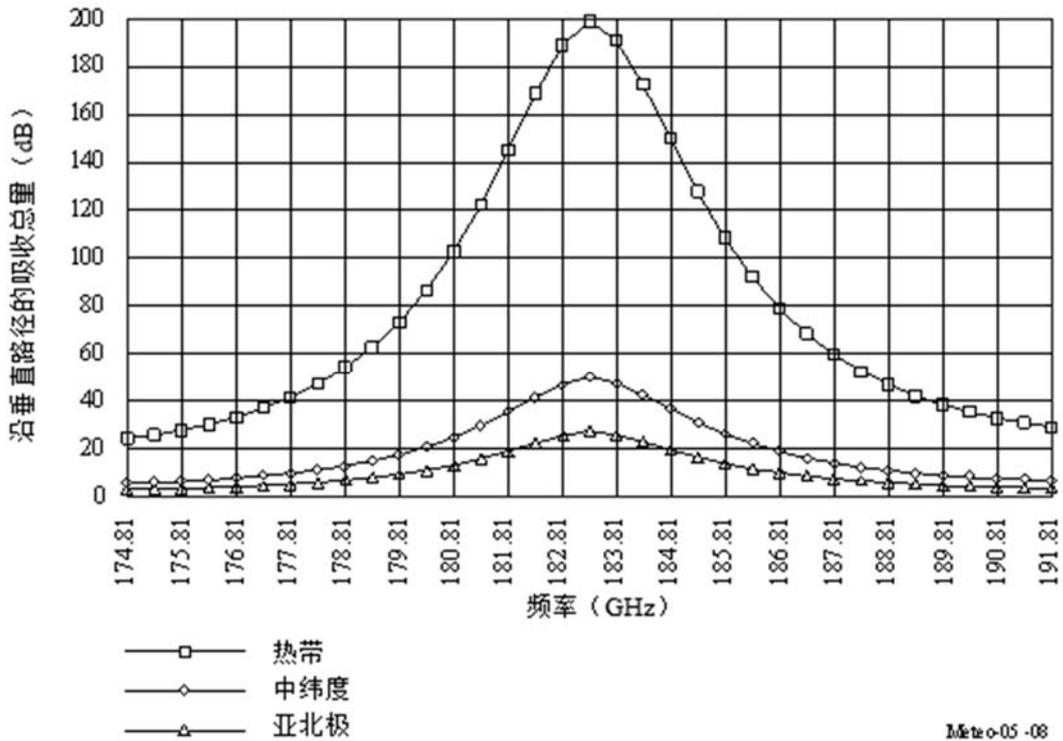


图 5-8

183.31 GHz附近沿垂直路径的水汽吸收光谱



5.2.7.2 垂直大气探测机制

空间垂直大气探测中, 辐射计在不同的频率(红外(IR)或微波)上测量大气从地表到顶层的总体影响。

每一层（按高度）辐射的能量与实地温度和吸收率与比例。一部分向上能量（辐射计方向）被上层大气吸收，而这一层则吸收了下层的部分向上发射。

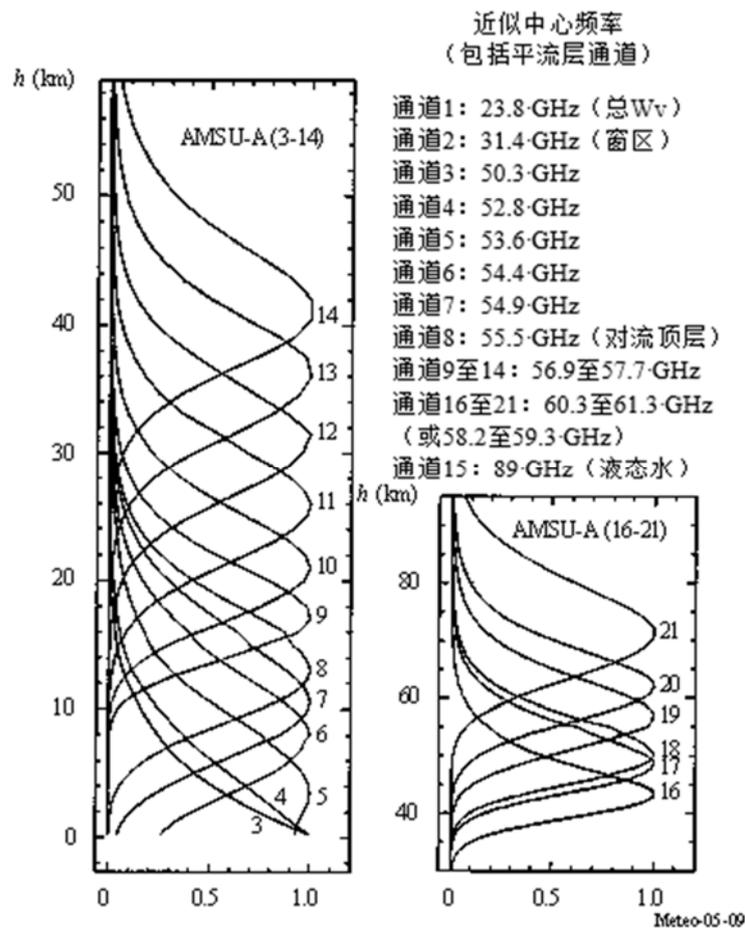
沿地球表面至卫星路径的辐射传递公式积分反映了这一机制，并形成加权函数，描述了不同高度大气层的相对影响，还表示了传感器的纵向（垂直）分辨率。

加权函数波峰值可能出现在任何高度，并取决于在所考虑频率上的吸收率。在吸收率低的频率上，波峰值接近地球表面。在吸收率高的频率上，波峰值接近大气顶层。探测器使用多个通道（见图5-9示例）。它们是在吸收带经过仔细挑选的，覆盖了较大范围的吸收率，以便在从地表到平流层高度获得最佳大气样本。

在60 GHz频段运行的微波温度探测仪的典型加权函数见图5-9。

图 5-9

在60 GHz附近运行的微波温度探



此外，不强调通道1 (23.8 GHz)、2 (31.5 GHz) 和15 (90 GHz) 的特殊重要性（图5-9中未显示）。辅助频道在获取O₂吸收光谱测量结果的过程中发挥了主导作用。因此，它们必须有类似的几何和辐射性能，必须得到类似的抗干扰保护。

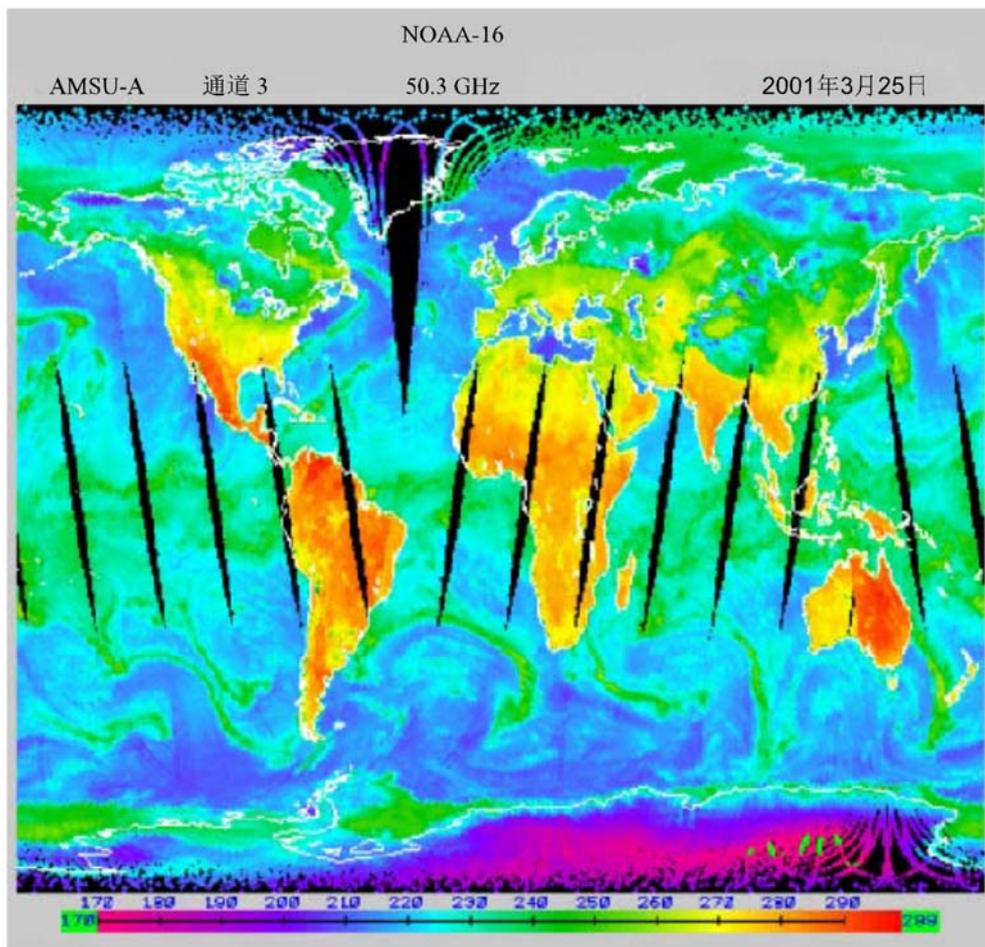
- 通道1接近H₂O的吸收峰值。用于获取沿视线水汽总含量，并确定其它通道必要的大气修正。
- 由于氧气和水汽，通道2的累积效应最小，是观看地球表面的最佳窗区通道，也是其它通道的参考。
- 通道15能够探测大气中的液态水，用于消除其它通道中测量结果的降水影响。

5.2.7.3 垂直大气探测的使用

垂直温度和湿度分布主要作为数值天气预报（NWP）模型的输入数据，至少需每6小时初始化一次。全球NWP（全球）模型用于进行5至10日内的天气预报，地理分辨率约为10公里。此外，已出现越来越多的区域/本地模型，用于短期内（6至48小时）的精确预测（几公里）。图5-10为AMSU-A无源微波传感器测量的全球温度（K）合成图，显示了在约12小时内的测量结果。观测结果包括地表的发射和反射，以及主要在地表以上5公里的氧气进行的发射（见图5-9）。

图 5-10

AMSU-A测量的全球温度（K）合成图



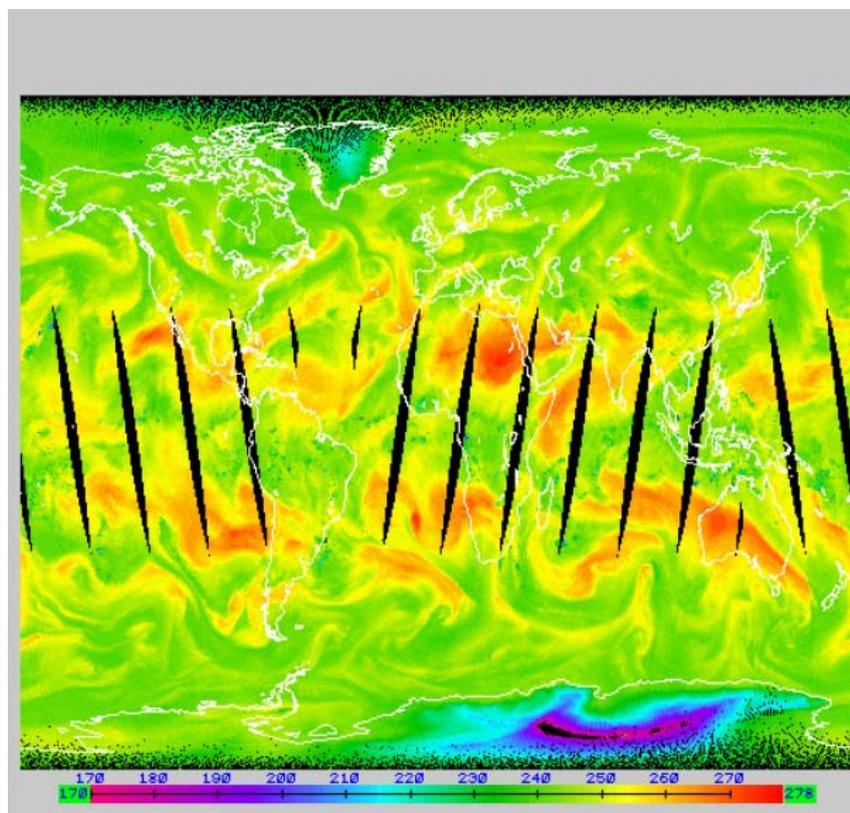
Meteo-05-10

图5-11显示了AMSU-B测量的全球温度（K）合成图。其中包含在约12个小时内的测量结果。AMSU-B是与AMSU-A共同运行的辐射计，以改善对流层水汽的探测。在183 GHz，当对流层上部比较干旱且传感器在更接近地表进行观测时，辐射计观测到热带和中纬度温度较高（橙色/红色）；当湿度较大且辐射来源于更高的大气层时，亮度温度较低（绿色）。

NWP模型采用Navier-Stokes偏微分方程。由于模拟了不稳定的大气机制，因此对最初三维成形的质量极为敏感。洛仑兹（Lorentz）已对该问题进行了描述，现已通过“混沌理论”得到了清楚解释。运行NWP模式需要最强大的超级计算机系统。

图 5-11

AMSU-B测量的全球温度（K）合成图



Meteo-05-11

为提高NWP的效率，需至少每6小时在全球范围内、以50公里（全球NWP）或10公里（区域/本地NWP）的分辨率对该模式的初始化进行改进和提高。在未来，将有必要约每3小时获得信息以便实现NWP模式的初始化。

5.2.7.4 在60 GHz范围运行的底视无源传感器的特性

用于测量对流层/平流层参数的大多数无源微波传感器为底视仪器。它们利用跨轨机械（目前）或推扫式（未来）扫描配置，形成包含天底方向、与卫星速度垂直的平面。此配置提供了最佳视场（FOV）和最佳平均数据质量。在60 GHz附近工作的低轨星载温度探测仪的典型特性见表5-2。

表 5-2

60 GHz频率范围内微波垂直探测仪的典型特性

特性	机械扫描 (目前)	推扫式扫描 (未来)
通道带宽 (MHz)	400	15
积分时间 (秒)	0.2	2.45
天线直径 (厘米)	15	45
3 dB点IFOV (度)	3.3	1.1
跨轨FOV (度)	±50	±50
天线增益 (dBi)	36	45
远旁瓣增益 (dBi)	-10	-10
波束效率 (%)	> 95	> 95
辐射分辨率 (K)	0.3	0.1
扫宽 (公里)	2 300	2 300
天底像素尺寸 (公里)	49	16
像素/行数	30	90

5.2.7.5 无源微波临边探测仪

微波临边探测仪 (MLS) 从大气层切线方向对大气层进行观测，用于研究频繁的光化学活动可能对地球气候产生严重影响的低到高层大气层。切线临边发射测量的主要特点包括：

- 使用最长路径，最大限度地增加来自低浓度大气微量成分的信号，并进行可能的高空探测；
- 垂直分辨率由穿过大气层的辐射传输和天线的垂直视场确定。见图5-12中的典型示例；
- 与视线垂直的水平分辨率主要由天线的水平视场和由卫星移动造成的拖影决定；
- 沿视线的水平分辨率主要由穿过大气层的辐射传输确定；
- 空间背景最适合发射测量的校准；以及
- 临边测量极易受卫星间链路干扰的影响。

微波临边探测仪于1991年首次推出，执行下列功能：

- 在15-120公里高度范围从两个侧视正交方向垂直扫描大气层；
- 分布测量的典型垂直分辨率（半值加权函数宽度）约为3至6公里，见图5-12；
- 典型的垂直观测方向30公里，沿观测方向为300公里；
- 在50 s内获得完整的分布信息；以及
- 在五个微波波谱区观测热临边发射（见表5-3）。

图 5-12

微波临边探测垂直加权函数（基于1.6米天线，高度为600米）

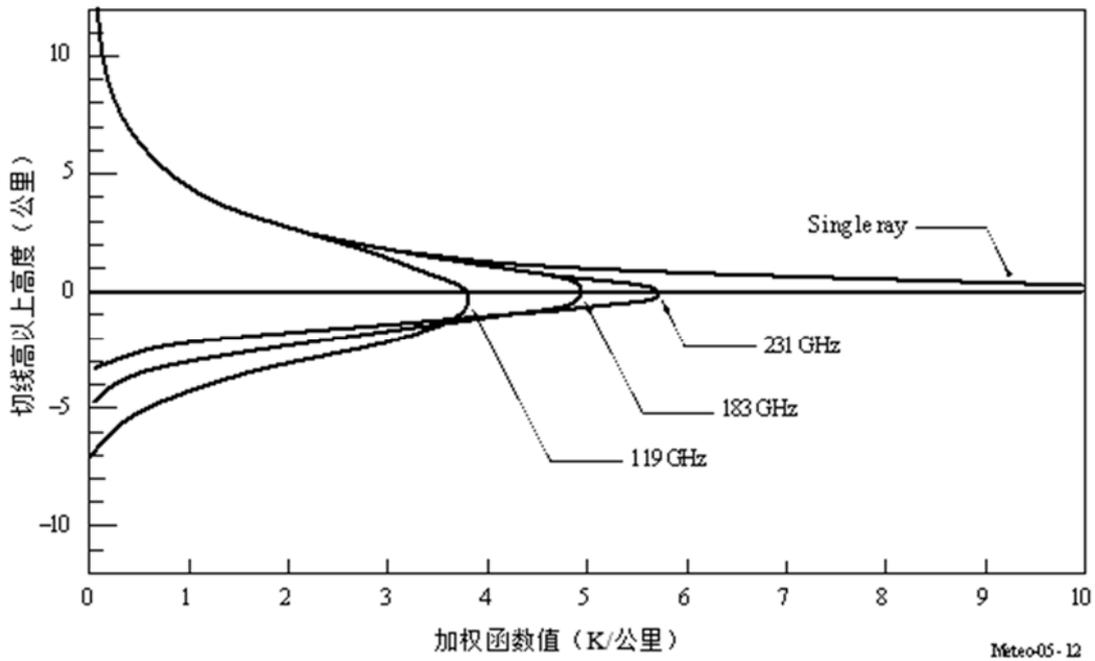


表 5-3

典型微波临边探测仪和光谱区的测量指标示例

地球物理参数	光谱区 (GHz)	高度 (公里)	均方根噪声 (间隔时间)
大气压	50-60	30-70	1% (2 秒)
风速	119	70-110	2-10 m/秒 (10 秒)
温度		20-100	0.5-3 K (2 秒)
O ₂		80-120	3×10^{-3} v/v (2 秒)
磁场	183	80-110	0.3-1 m 高斯 (Gauss) (10 秒)
H ₂ O		15-90	1×10^{-7} v/v (2 秒)
ClO	205	20-40	2×10^{-10} v/v (10 秒)
O ₃		15-90	1×10^{-8} v/v (2 秒)
H ₂ O ₂		20-50	9×10^{-10} v/v (10 秒)
O ₃	231	15-90	1×10^{-8} v/v (2 秒)
CO		15-100	1×10^{-7} v/v (10 秒)

新一代的微波临边测深仪测量较低平流层的温度以及H₂O、O₃、ClO、BrO、HCl、OH、HO₂、HNO₃、HCN和N₂O的浓度，调查臭氧消耗、温室气体转变和气候变化的辐射强迫作用，以及上述因素在这些方面的影响。MLS也测量上对流层H₂O、O₃、CO和HCN对气候变化的辐射强迫作用的影响，并调查对流层和平流层交换。

微波临边探测仪通过测量化学循环中破坏臭氧层的诸多自由基、贮存物质和源气体观测臭氧化学的详细情况。这一系列的测量是对是否了解全球平流层化学的严格检验，将有助于解释臭氧层的变化趋势，并能提供该区化学变化的早期预警。

最初的微波临边探测仪显示了测量上对流层水汽分布的能力。这方面的知识对于理解气候变异性和全球变暖是必不可少的，先前在全球范围内进行可靠观测是极为困难的。

未来的微波临边探测仪可能利用其它频率观测到更多的大气化学组成和物种。

5.2.7.6 无源微波探测仪的易受干扰性

无源传感器接收所有自然（有用）和人为（有害）发射。一般情况下，由于大气层是一个非常不稳定的媒介，时空特性变化迅速，它们无法区分这两种类型的信号。无源传感器遇到的一个特别问题是在传感器的测量区范围内存在着大量的低功率发射器。这些低功率发射器包括超宽带（UWB）设备工业、科学和医疗（ISM）应用和短距离设备（SRD）等。随着此类地面有源设备密度的增大，这种情况将越来越多严重，已报告出现了有害干扰的情况。

因此无源传感测量极易受到干扰，即使在非常低的功率电平情况下亦是如此，这可能产生非常严重的不利后果：

- 已经证明，即使只有0.1%的卫星数据采样受损，也足以造成数值气象预报预测中不可接受的错误，从而破坏对这些独特的全天候被动测量的信任。
- 可能出现干扰（如能探测到）时系统地删除数据可能造成错过标志迅速发展、具有潜在危险的风暴的重要迹象，并且造成无法识别新发展的天气系统。
- 如果干扰处于检测不到的低功率电平（很有可能），损坏的数据将被误认为是有效的数据，分析这些整合的损坏数据得出的结论将存在严重缺陷。
- 对于气候研究，特别是“全球变化”监测，干扰可能会导致对气候信号的误解。

ITU-R RS.2017建议书分别提供了所需的辐射性能和可以满足所需性能的容许干扰电平。

5.3 有源传感器

5.3.1 引言

本节的目的是说明星载有源传感器，特别是气象现象监测中使用的传感器的无线电频率需求，旨在介绍传感器的独特类型和决定各自频率需求的特性；提出在相关频段与其它业务兼容性研究所需的性能和干扰标准，并介绍星载有源传感器与其它业务兼容性的研究现状，以及存在的任何问题或疑虑。

本手册中涉及了五种主要有源星载传感器类型：

类型 1：合成孔径雷达（SAR） – 天底轨迹侧视传感器，收集相干雷达回波随相位和时间的变化情况，从而产生地球表面的雷达图像。

类型 2：测高计 – 底视传感器，通过测量发射和接收事件之间的精确时间提取精确的海拔高度，包括沿海和内陆水域。

类型 3：散射计 – 天底轨迹多视传感器，使用随方位角变化的回波功率的测量结果确定海面风向和风速，包括沿海和内陆水域。反向散射也可用于观察所有的陆地表面，鉴于地球表面条件，如土壤水分和陆地上的雨水。

类型 4：降水雷达 – 垂直天底轨迹方向扫描的传感器，测量降雨雷达回波，以确定地表降雨率和降雨的三维结构。

类型 5：云廓线雷达 – 底视传感器，测量云层的雷达回波，以确定地表以上的云反射率廓线。

表5-4概述了五种主要有源星载传感器类型的特性。

表 5-4

有源星载传感器特性

特性	传感器类型				
	SAR	测高仪	散射计	降水雷达	云廓线雷达
视角几何	侧视，倾斜10°-55°	底视 多入射视角	<ul style="list-style-type: none"> - 方位角三条/六条扇形波束 - 一条或两条锥形扫描波束 	围绕天底横向扫描	底视
覆盖区/ 动态	<ul style="list-style-type: none"> - 固定一侧 - （扫描式合成孔径雷达） - 聚光灯 	固定在天底多入射视角	<ul style="list-style-type: none"> - 固定在方位角 - 多锥形扫描波束 	经天底轨迹扫描	固定在天底
天线波束	扇形波束	笔形波束	<ul style="list-style-type: none"> - 扇形波束 - 笔形波束 	笔形波束	笔形波束
辐射峰值功率 (W)	1 500-8 000	20	100-5 000	600	1 000-1 500
波形	线性FM脉冲	线性FM脉冲	间歇CW或短脉冲（海洋）或线性FM脉冲（陆地）	短脉冲	短脉冲
带宽	20-1200 MHz	320/500 MHz	5-80 kHz（海洋）或1-4 MHz（陆地）	14 MHz	300 kHz
占空系数 (%)	1-30	46	31（海洋）或10（陆地）	0.9	1-14
业务区	陆地/沿海/海洋	海洋/冰	海洋/冰/陆地/沿海	陆地/海洋	陆地/海洋
典型频段	1.3 GHz、5 GHz、9 GHz和36 GHz	5 GHz、13 GHz 和 36 GHz	1.3 GHz、5 GHz和 13 GHz	36 GHz和78 GHz	94 GHz、138 GHz和 238 GHz

5.3.2 合成孔径雷达 (SAR)

SAR提供地球表面的雷达图像。RF中心频率的选择取决于地球表面与电磁 (EM) 场的相互作用。RF带宽影响图像像素的分辨率。图5-13a) 显示了线性调频脉冲，下方为相应的RF带宽。距离分辨率等于 $c/2/(BW \sin \theta)$ ，其中 c 是光速， BW 是RF带宽， θ 是入射角。如要得到 30° 入射角时1米的距离分辨率，RF带宽应为300 MHz。许多SAR辐照偏离速度矢量一侧的扫幅，如图5-13b) 所示。辐照扫幅区范围内的任何干扰源都将反馈给SAR接收机并降低图像像素质量。容许的图像像素质量退化决定了容许的干扰电平。图5-14为以色列和约旦之间死海的SAR图像。

图 5-13

线性调频频谱和SAR照射扫幅

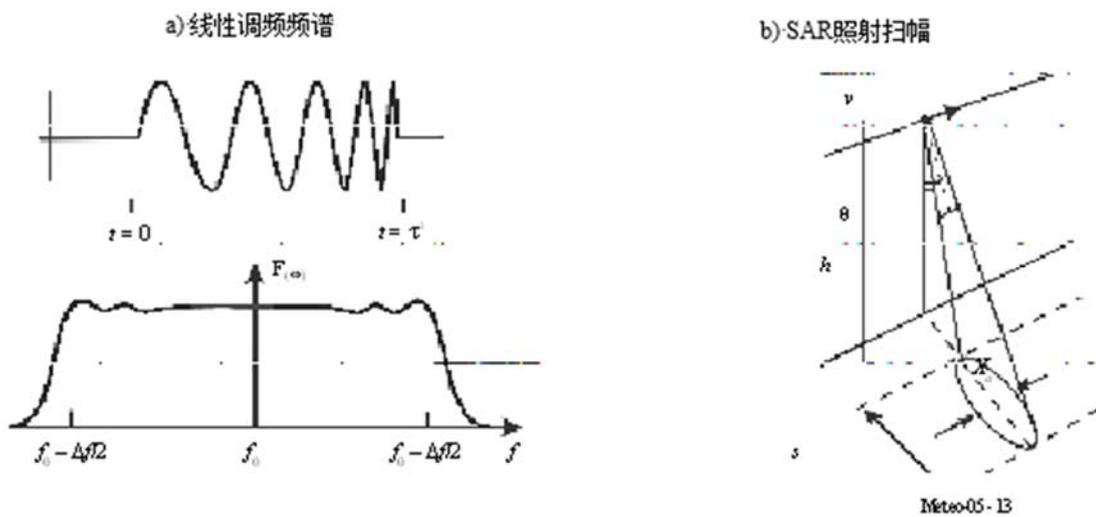


图 5-14

沿以色列和约旦之间约旦河西岸死海的SAR图像

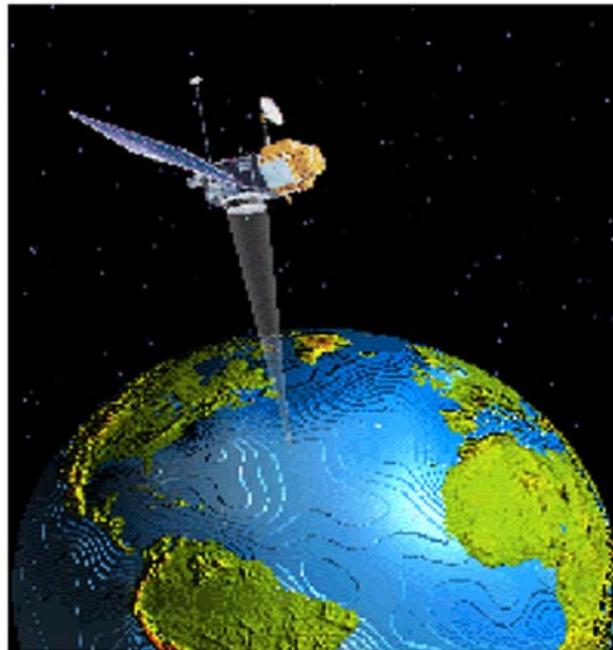


Meteo-05 - 14

5.3.3 高度计

高度计提供地球海平面高度的测量结果。图5-15、5-16a)和5-16b)描绘了卫星高度计及其典型测量精度。RF中心频率的选择取决于海洋表面与EM场的相互作用。双频操作补偿了电离层延迟。例如,使用13.6 GHz和5.3 GHz附近频率是一种可能的双频安排。较宽的RF带宽影响高度的测量精度。时差精度 Δt 与RF带宽BW成反比。容许的高度精度退化决定容许的干扰电平。一些卫星高度计测量海洋地形的精确度已达到4.2厘米。建议ITU-R RS.1166-4中规定的容许性能下降为4%。

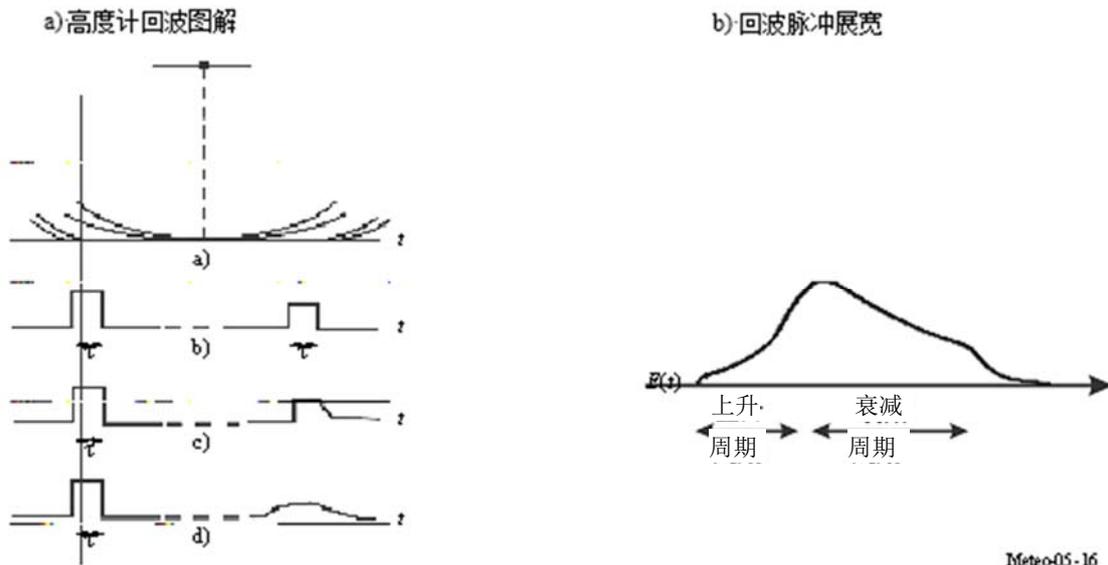
图 5-15
微波卫星高度计



Meteo-05 - 15

图 5-16

高度计回波图解和回波脉冲展宽



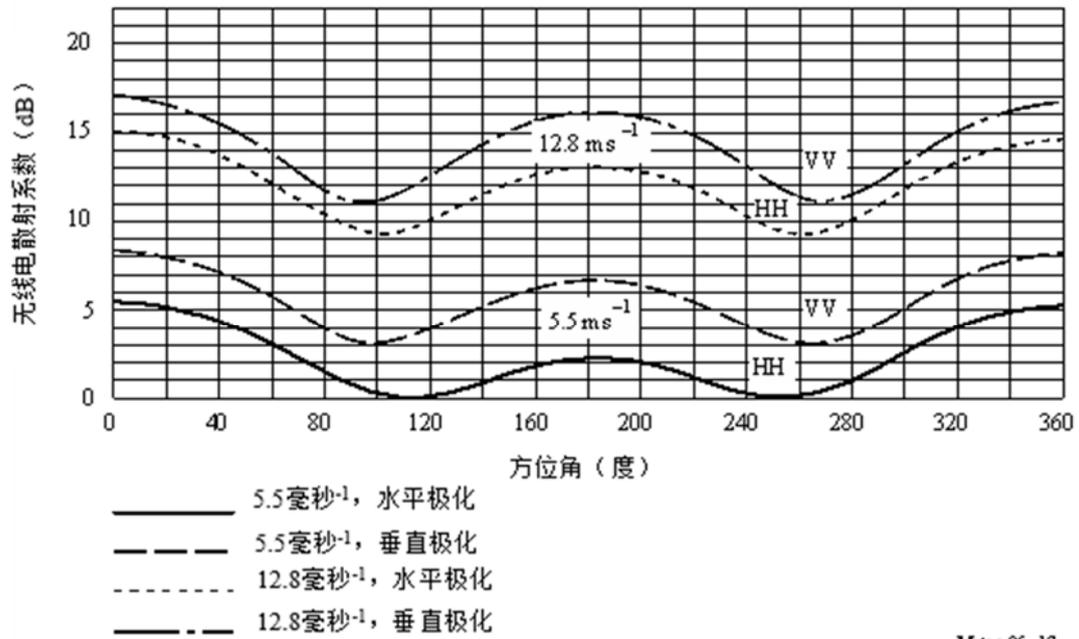
Meteo-05 - 16

5.3.4 散射计

散射计主要提供海面风向和风速的测量结果以及海冰范围和特征。RF中心频率的选择取决于海洋表面与EM场的相互作用及随视界角发生的变化。图5-17显示了随与风速矢量方向相对的视界角变化的后向散射水平。

图 5-17

随视界角变化的后向散

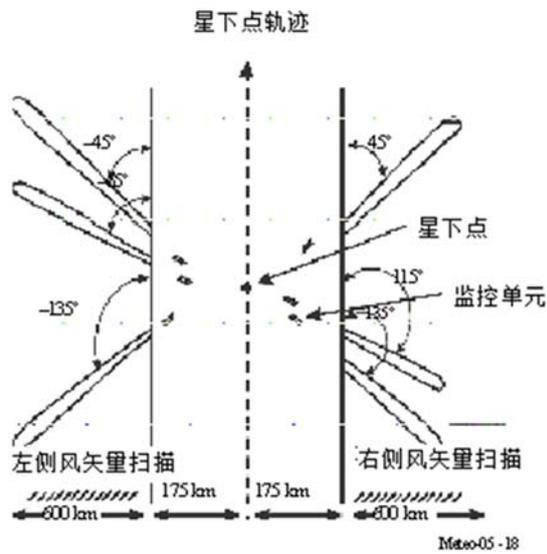


Meteo-05 -17

如图5-18所示，典型的散射计在几个不同的固定视界角度辐照地球表面。在图5-19中，散射扫描笔形波束以两个不同的倾斜视角进行了扫描，并以方位角围绕天底进行了360度扫描。

图 5-18

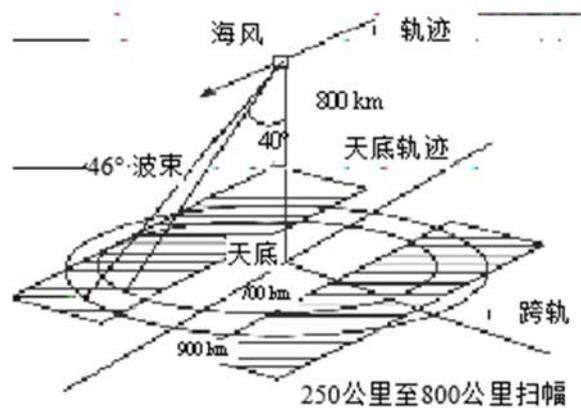
散射计固定覆



Meteo-05 -18

图 5-19

散射计笔形波束扫

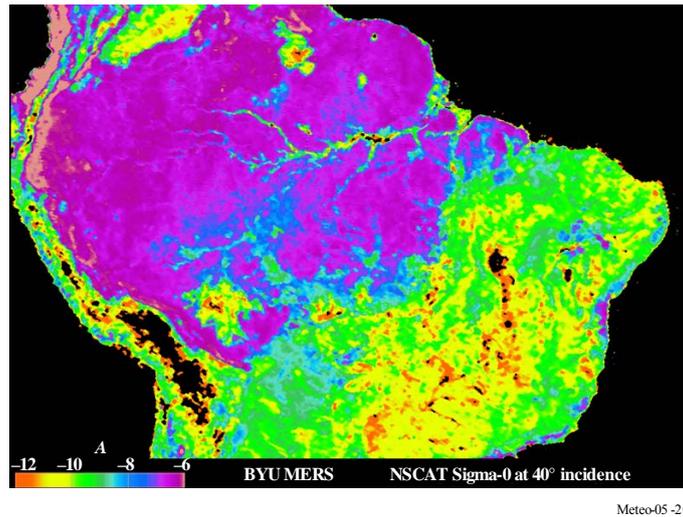


Meteo-05 -19

散射仪的主要功能是研究海上的风，但科学家设计了一种研究仪器雷达反向散射变化的方法，也可以根据地球表面的条件（如土壤水分和陆地上的雨水）观测所有的地表情况。图5-20为NSCAT散射计采集的南美洲亚马逊雨林的雷达图像示例。散射仪的雷达对地球表面的状况较为敏感，如植被的类型和密度。

图 5-20

南美洲亚马逊雨林的NSCAT散射计雷达图像



5.3.5 降水雷达

降水雷达提供地球表面降水率的测量结果，通常侧重热带地区的降雨。

RF中心频率的选择取决于降水与电磁场的相互作用。球面水凝物的后向散射截面为：

$$\sigma_b = \pi^5 |K_W|^2 D^6 / \lambda^4 = \pi^5 |K_W|^2 Z / \lambda^4 \quad (5-4)$$

其中：

$|K_W|^2$ ：与水滴中水的折射率有关

D ：水滴直径 (m)

λ ：雷达波长 (m)

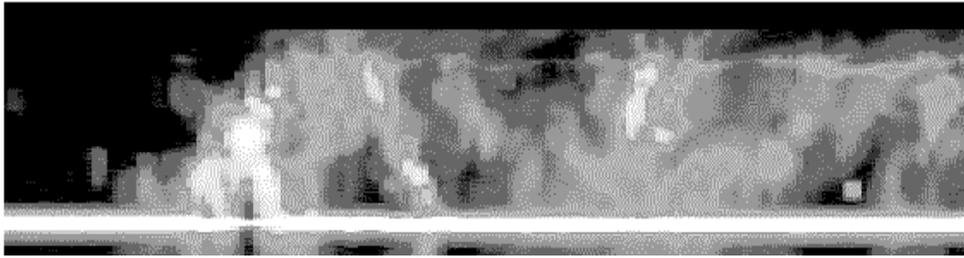
Z ：雷达反射率因子

后向散射与RF频率的四次方成正比。

图5-21为雷达反射率因子垂直截面示例。狭窄的RF信号脉冲宽度提供了所需的测量距离分辨率。一种降水雷达脉冲宽度为1.6 μs ，但其它系统可能有所不同。容许的最小降水反射率退化决定容许的干扰电平。

图 5-21

由降水反射率测量结果合成的反射率



Meteo-05-21

5.3.6 云廓线雷达

云廓线雷达提供地球表面以上云反射率的三维剖面。图5-22为按高度变化的代表性反向散射反射率。

RF中心频率的选择取决于海洋表面与电磁场的相互作用以及随视界角发生的变化。

公式(5-5)表示云层回波功率电平的计算。

$$\tilde{P} = \frac{\pi^5 10^{-17} P_r G^2 t \theta_r^2 |K_W|^2 Z_r}{6.75 \times 2^{14} (\ln 2) r_0^2 \lambda^2 l^2 l_r} \quad \text{mW} \quad (5-5)$$

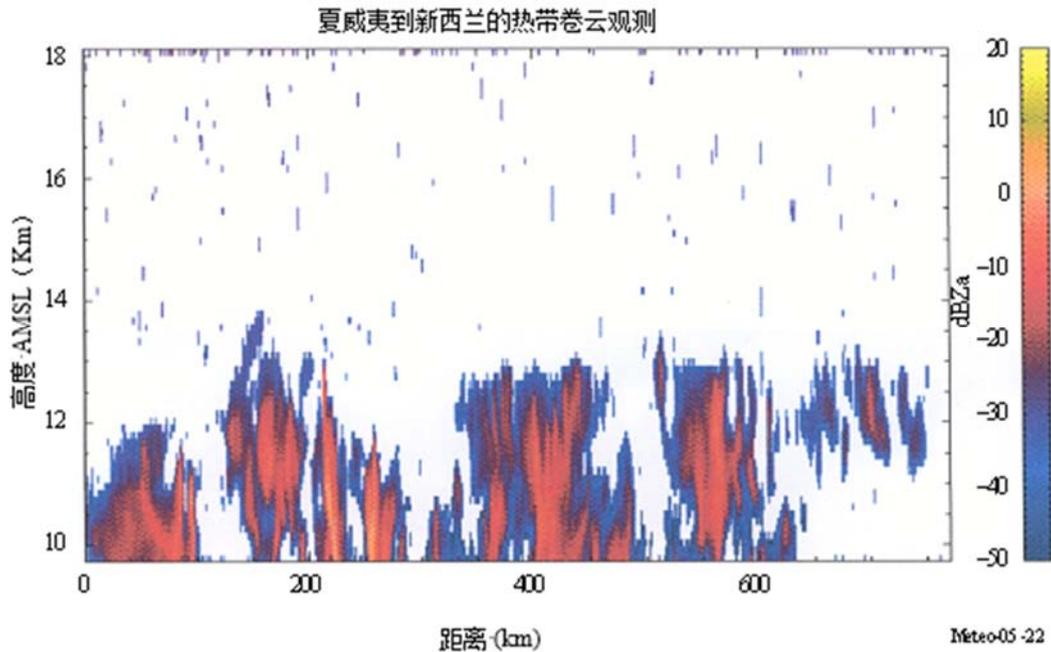
其中：

- \tilde{P} : 云层的回波功率电平 (mW)
- P_r : 雷达发射功率 (W)
- G : 天线增益 (数字)
- t : 脉冲宽度 (μs)
- θ_r : 3 dB 天线束宽 (度)
- K_W : 云水含量的介质因数
- Z_r : 云层反射率因子 (mm^6/m^3)
- r_0 : 射程距离 (km)
- λ : 雷达波长 (cm)
- l : 大气吸收造成的信号丢失
- l_r : 雷达系统损耗。

如此公式所示，回波功率与波长的平方成反比。由于频率与波长成反比，回波功率与RF频率的平方成正比。在小粒子（瑞利粒子）的情况下，回波功率与频率的四次方成正比，因为这一比率取决于与波长相关的粒径。云廓线雷达天线旁瓣很低，以离析云回波与旁瓣所辐照的较高地面的回波。

图 5-22

卷云反射率示例



5.3.7 传感器干扰和性能标准

ITU-R RS.1166建议书提供了各类有源星载传感器的性能和容许干扰标准。该建议定期进行修订，以反映规则修改（诸如新的EESS（有源）分配）以及传感器最新技术的变化，因为这将影响现有的性能和容许干扰的标准。

5.3.8 功率通量密度（pfd）电平

表5-5中的各类有源星载传感器特性显示了所发射的峰值功率以及因此在地球表面所接收到的功率电平有很大差异。表5-6列出了对于一些典型的传感器配置，地球表面的有源传感器功率通量密度电平。

表 5-5

地球表面的典型功率通量密度电平

参数	传感器类型				
	SAR	高度计	散射计	降水雷达	云廓线雷达
辐射功率 (W)	1 500	20	100	578	630
天线增益 (dB)	36.4	43.3	34	47.7	63.4
距离 (公里)	695	1344	1 145	350	400
pfd (dB(W/m ²))	-59.67	-77.25	-78.17	-46.55	-31.64

第6章

用于气象活动的其它无线电通信系统

	页码
6.1 引言	100
6.2 播发系统	100
6.3 水文系统	100
6.4 用于远程气象和环境系统的无线电通信	101
6.5 全球导航卫星系统（GNSS）在气象领域的使用	101
6.6 雷电探测系统	102
6.7 地基遥感	104
6.8 无人机系统	105

6.1 引言

如第1章所述，气象业务须从许多远程站点（陆地和海上）收集观测数据。因此，除前几章所述的卫星气象、气象辅助业务、无线电定位和EESS服务外，气象观测系统还依赖于许多其它的无线电通信业务。

无论在人口稠密地区还是边远人烟稀少地区，气象学家还有必要尽可能及时地向客户播发信息和警报。此外，气象服务用于支持水上操作和世界范围内的航空运营。为此，气象产品播发系统还利用了多种无线电通信业务。

6.2 播发系统

天气预报的播发与天气资料的收集和归档同样重要。将这些预测提供给公众是拯救生命的前提条件，因为可让人们采取必要的措施来保护其生命和财产。

多年来已开发了一系列专门用于分发预报和其它气象数据的无线电系统，其中最简单的是语音广播。这些系统通常使用VHF无线电，广大公众仅使用最基本的设备即可。这些系统用于向公众提供具有威胁性的暴风雨、洪水、极端温度及其它自然和人为灾害预警。还可提供增强型业务，如聋人使用专用设备可接收的简要数据传输。这些系统还可用来提供持续的数据分发，或保持静止，直至受到代表一种特殊事件（如恶劣天气或其他迫在眉睫的危险）的警报音的刺激。播发系统可出现在固定和移动业务（包括水上移动业务）中。其他播发系统通过无线电和电视广播（地面和卫星）以及MetSat下行链路上运行。

近年来，许多主管部门已使用高频无线电向海上船只和飞机提供天气和预警信息。这些系统通常提供语音传输和气象传真（WEFAX）。然而，HF的不可靠性导致许多此类系统向卫星传输过渡。

最后，还应指出，目前，通过C频段（3 400-4 200 MHz）和Ku频段（10 700-11 700 MHz）商业有效载荷的卫星固定业务系统已在全球范围内用于播发天气、水和气候相关的信息，包括向气象机构和用户团体提供灾害预警。C频段卫星的使用在传播条件（如热带和赤道区的较大降雨量）不允许采用其他任何电信支持的地区尤为重要。

6.3 水文系统

在世界许多地区，洪水是生活中自然且不可避免的一部分，帮助预测洪水的发生、地点和规模的系统已挽救了许多生命，保护了大量财产。先进的知识有助于疏散易受影响的群体、建造堤坝、转移可移动的宝贵但易损的财产。

气象雷达网络（见第4章）是水文过程中的重要工具，作为对其的补充，具体的水文系统通常用于测量降水量、水位高度和积雪深度，所有这些在洪水预测和预警中都是必要的。它们还有助于估算水资源的可用性。

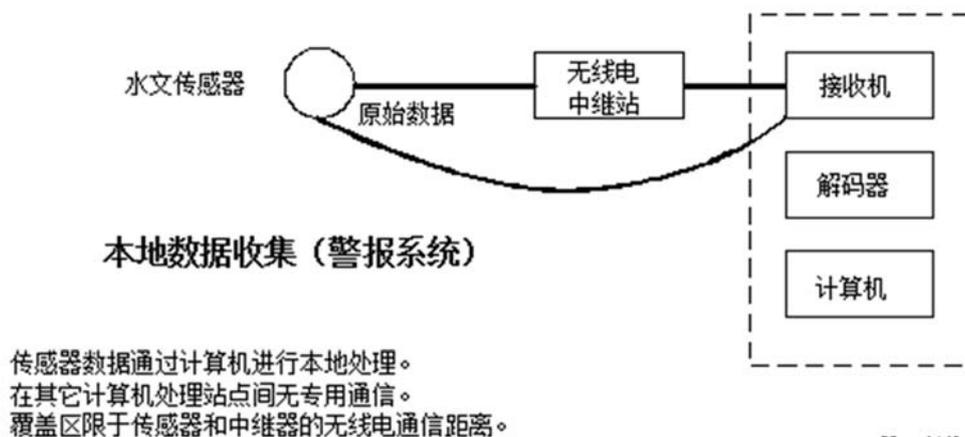
仅在美利坚合众国，每年平均洪涝灾害的损失接近40亿美元。不断遭遇洪水问题和在洪水发生时易遭受巨大损失的社区正不断寻求各种方法，尽量减少损失。自动水文系统是有利的解决方案，

因此它们的运作成本低，还可提高其他防洪减灾方法（如水库闸门应用、洪水保险或划定洪泛区域）的效力。

自动化水文系统包括事件报告气象和水文传感器、无线电通信设备和计算机软硬件。在最简单的系统中，编码信号通常使用固定或移动业务中的VHF或UHF频段，利用无线电通信设备向基站进行发射（通常通过中继站）（见图6-1）。基站收集这些编码信号，将其处理成有意义的水文气象信息，该信息可显示或绑定于报警系统，并在超过预置标准时，通知给应急管理人员。

图 6-1

水文系统示意图



Me to-01-01

6.4 用于远程气象和环境系统的无线电通信

这些系统的技术特性（包括操作频率）差异较大，可使用几乎任何气象射频（RF）频段。通常根据必要带宽进行选择，这又取决于所要承载信息的类型和数量。气象服务中的固定远程系统有多种用途，并在一些RF频段运行。顾名思义，它们是在固定位置运行的。典型用途包括：

语音键入或馈线链路用于向数据播发发射机站点传输控制或数据信号，这些站点往往位于偏远地区（如山顶），以最大限度地扩大其覆盖范围。

雷达遥控用于从雷达本身（通常为远程）将雷达回波信号承载至数据处理之处。运营商还使用RF进行雷达站点设备的远程控制。

数据收集用于从远程收集站点向中央存储或处理设备传送水文和气象传感器收集的数据，用于测量风、雨、温度、积雪深度、地颤（用于地震探测或预测），或任何一些其它的自然现象。

6.5 全球导航卫星系统（GNSS）在气象领域的使用

目前气象学家已将在1 575.42 MHz（指定的L1频率）和1 227.6 MHz（指定的L2频率）发射的GPS信号（以及GLONASS信号）用于：

- 移动气象观测台定位：如气象气球所运载的无线电探空仪、随降落伞落下的下投式探空仪、携带气象传感器的无人驾驶飞机（见第3章），或水上气象系统，如海洋浮标。
- 高精度时间同步：远程观测点之间，例如根据雷闪探测系统的要求（见第6.5段）。
- 测量大气中的水蒸气总量：由地基接收机接收的GPS信号中的相位延迟得出。计算水蒸气总量要求精确计算各GPS卫星的位置和卫星时钟的计时，还必须准确了解地面接收机的位置。GPS接收机通常安装在固定座架上以准确跟踪在地球表面上的位置并提供气象信息。这样，测量结果可能是大地/地震观测的副产品或由气象学家特别部署的传感器得出。通过两个GPS频率 - L1和L2 - 之间的相位延迟差异确定信号通过电离层的传输产生的相位延迟。如地面气压和温度已知，可估算出由大气层产生的干静力相位延迟，其余的相位延迟与沿到达卫星的路径的水蒸气总量成比例。地表的GPS传感器在很短的时间内接收来自多个方向的GPS信号。因此，有可能估算垂直方向的水蒸气总量以及传感器周围水平方向水蒸气总量的梯度。该技术支持对沿从地面接收机到卫星的倾斜路径的水蒸气含量进行直接测量，因此与大气传播研究相关。亦见[Coster等，1997年]。
- 温度和相对湿度的测量，形成由GPS信号的空基掩星观测得出的高度函数：在此应用中，独立卫星的接收机接收到来自GPS星座、穿过大气切线入射地球表面的信号。在地球表面以上不同高度测量GPS信号的折射率，这样可推导出空气的折射率，得出高度函数。在中性大气的上层，相对湿度很低，因此可假定空气的折射率直接取决于温度。在对流顶层以下更接近地球表面的部分，温度和水蒸气分压影响折射率。如从他处已得知温度，则可估算水蒸气分压。通过该技术得出的气象变量的测量结果比天底观察无源传感辐射计的垂直分辨率更高，见第5章，但在水平方向经过相对较长的距离将达到平均水平。如水蒸气总量测量一样，该技术要求计时非常准确，并准确了解两颗卫星的位置。GNSS接收机计划用于下一代极轨气象卫星。

6.6 雷电探测系统

今天，业务气象学家有必要进行雷电活动遥感，这是业务气象学家可使用的重要工具。随着天气雷达和气象卫星产品使用的发展，客户的需求也在不断提高。鉴于在许多发达国家有必要进行地表天气观测的自动化，因此也提出了一项重中之重的要求。这些系统的可靠运行与陆海空的工作安全保护有明显联系。提供有效的预报服务将影响商业和国防活动的效率。处理电源线的工程师和处理爆炸物品人员等的安全将受益于有效的雷电预测。

雷电探测是一项被动的活动，主要是使用无线电接收机探测由雷电产生的波前。单个探测点的数据可由任何通常的方式（包括固定链路、电话、互联网等）分发。

在目前的操作系统中，闪电的位置可通过测量相关球形（大气波）的到达方向，或通过测量球形的到达时间，或通过两者共同确定。

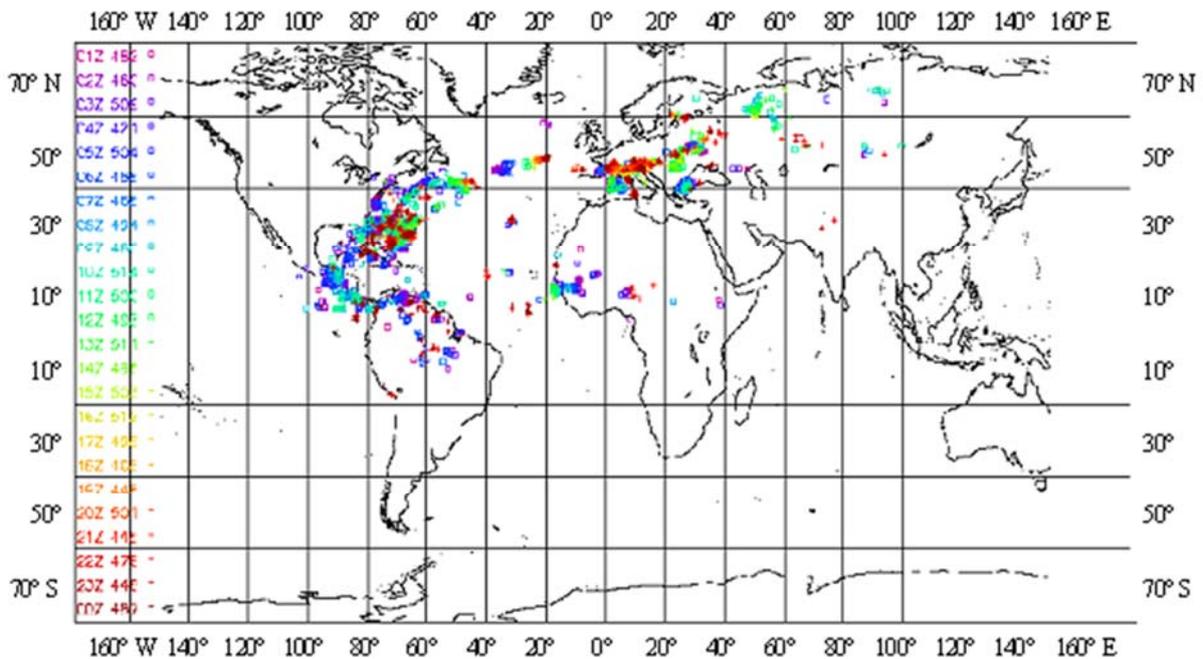
要求在三个以上间隔距离较远的遥感点进行测量。实际中使用的站点数量通常大于最小数目，以便提高所报告位置的可靠性。在观测距离达数百公里时，到达时间系统通常比测向系统提供的位置更为准确。这是由于在检测点检测到天波的接收方向，这通常与放电的实际方向略有不同，并根据接近遥感点的表层状态而变化。到达时间系统通常依赖于GPS无线电导航信号，以便在各遥感点实现必要的时间同步。所有的系统均有赖于从远程站点到中央处理器的经济高效、可靠的通信。根据所要求的监测地区和系统的特定用途，用于定位雷电活动的无线电频率有所不同。

通过观测以10 kHz为中心的频率（2-15 kHz），可有效进行达数千公里的超远距离定位（见图6-2），诸如英国气象局运行的ATDNET系统。在此系统中，遍布全球、间隔达2 000公里的远程站点接收球形波。传感器对球形波进行傅立叶分析和时间标注。标注时间的样本被立即传回中央控制台，并根据不同站点到达时间的差异计算出闪电放电的位置。有时可在受影响的传感器站点使用可调陷波滤波器抵消较低电平的干扰，但普遍和较高电平的干扰对系统的运行极为有害。

考虑到此类远程闪电探测网络的重要性以及需要得到全球认可，WRC-12上给气象援助服务（仅限于无源传感器）分配了具体的波段8.3-11.3 kHz。

图 6-2

远程系统一天内雷电数据分布图



在此24小时内有11 581次雷雨记录

Méteo-06-02

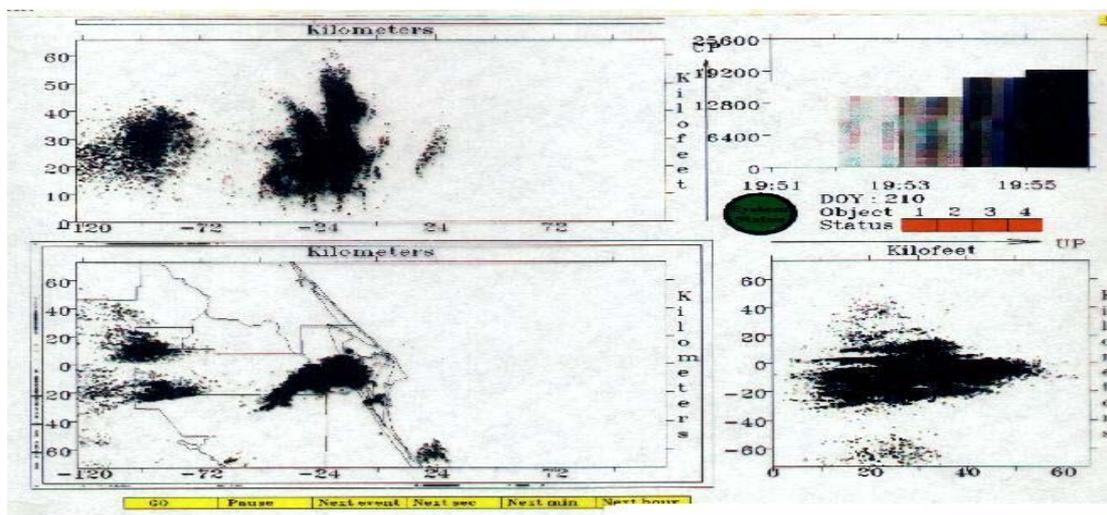
用最广泛的操作系统覆盖的地区较小，但更为详细。在这种情况下，在以200 kHz为中心的较高频率（所使用的宽带接收机在其1 kHz至350 kHz频率范围中间最灵敏）观测球形波，根据对云到地面或云到云闪电的侧重不同，遥感点通常间隔100公里至400公里。在这些较高频率，可通过球形波前缘明显地振幅上升确定云到地面闪电放电。可准确测定此前缘的到达时间。网络站点所记录的时间传输至中央处理器，用于计算放电的位置。在许多情况下，结合业已安装的磁场测向系统共同对网络的到达时差进行处理。[Holle和Lopez，1993年]讨论了不同的雷电探测系统，[Diendorfer等，1994年]探讨了其在奥地利网络的观测结果。

此外，在一些地区有必要观测与雷雨活动相关的所有放电活动（包括云到地面和云到云放电）。通过在非常高的频率（63 MHz和225 MHz用于闪电探测和测距系统（LDAR），而SAFIR（闪电监测和雷暴预警系统）系统使用110至118 MHz）上进行观测来实现。图6-3显示了实时LDAR图像。如要观测所有活动，风暴须保持在视线之内。这要求对地面传感器进行短基线配置 – 传感器须相隔30公里，距地面约50米，以满足雷达地平标准。然而，在实际中一些观测云到云活动的操作系统在运行中使用间隔更远的地面传感器，依靠低频率云到地面系统收集在较低位置放电的详细情况。

图6-3中的左下图在佛罗里达东海岸地图（部分显示）上标明了LDAR数据。然后将该数据映射到东西与高度图（左上）和北南与高度图（右下，注意此图旋转了90度）。柱状图（右上）显示了五个一分钟增量的数据。

图6-3

实时LDAR显示



Meteo-06-03

6.7 地基遥感

第5.1段中详细介绍了使用卫星无源遥感进行垂直大气探测的情况。进行本地详情预测的气象学家或研究行星边缘的科学家需要大气探测提供比卫星系统不能提供的更高的近地垂直分辨率。

提供这一信息的一个方法是使用上视无源遥感，并在地球表面安装辐射计。这些辐射计使用50 GHz和58 GHz之间氧谱带中的特定信道，用于测量温度结构。21 GHz和24 GHz之间的信道用于提供垂直方向水蒸气变化的信息，30 GHz范围的窗口观察用于云识别。水蒸气的测量还将受益于在183 GHz水蒸气吸收带的下翼进行的其他观测。

尽管用于温度和湿度地基遥感的信道与无源卫星遥感处于类似区域，它们通常使用更宽的波段，包括与其他服务共享的波段。在一些频率，特别是RR No. 5.340涉及的波段，地基辐射计受益于与卫星遥感不同但与其他波段相同的保护，地基辐射计可能需要相关的保护。正在运行的地基辐射计的数量还是相对较少，但在未来预计将进行大量部署。可能需要制定一种可行的共用方法，设计辐射计的部署位置，以避免来自其他业务的干扰。

大量地基辐射计的部署还有利于其它大气成分（如臭氧）的无源遥感（特别是在142 GHz）。

6.8 无人机系统

无人机系统（UAS）对气象和地球观测作业已变得越来越重要。UAS满足了无法部署传统系统、由于飞行时间较长不可能进行载人飞行及危险地区（例如：飓风、气旋）的观测要求。用于气象目的的UAS操作（2008年）使用无需审批的频谱用于飞机的指挥和控制，但一些系统确实使用需审批的频率。UAS可用于在历来缺少探空数据的洋区常规投放下投式探空仪，飞入飓风和龙卷风就地收集数据，对受到恶劣天气或干旱条件影响的地区进行空中侦察，以及检测北极冰层融化等应用。

将UAS用于气象操作可提高对飓风登陆地区的预测、为公众提供更多的准备时间，并使我们能够更好地了解我们的气候。除UAS的指挥和控制外，有效载荷数据传输也需要使用频谱。这可在划分给气象辅助（MetAids）业务的适当频段，或根据数据量在其他频段进行安排。

参考资料

- ALLEN, R. H, BURESS, D. W. and DONALDSON, R. J. [1981] *Attenuation Problems Associated with a 5 cm Radar*, Bulletin of the American Meteorological Society, 62, No. 6, June 1981.
- BEAN, B. R. and DUTTON, E. J. [1966] *Radio Meteorology*, National Bureau of Standards Monograph 92, US Government Printing Office, Washington DC, United States.
- BURROWS, C. R. and ATWOOD, S. S. [1949] *Radio Wave Propagation, Consolidated Summary Technical Report of the Committee on Propagation of the National Defense Research Committee*, Academic Press, New York, United States.
- COSTER, A. J., NIELL, A. E., BURKE, H. K. and CZERWINSKI, M. G. [17 December 1997] *The Westford water vapor experiment: use of GPS to determine total precipitable water vapour*. MIT/Lincoln Laboratories.
- DIENDORFER *et al.* [1994] *Results of performance analysis of the Austrian lightning location network*. ALDIS, 22nd International Conference on Lightning Protection, Budapest, Hungary.
- DOVIAK, R. J. and ZRNIC, D. S. [1984] *Doppler radar and weather observations*. Academic Press, Inc., San Diego, United States of America.
- DOVIAK, R. J. and ZRNIC, D. S. [1993] *Doppler radar and weather observations, 2nd Ed.* Academic Press, Inc., San Diego, United States of America.
- DOVIAK, R. J., ZRNIC, D. and SIRMANS, D. [November 1979] *Doppler Weather Radar. Proc. IEEE*, Vol. 67, 11.
- DOVIAK, R. J., SIRMANS, D., ZRNIC, D., AND WALKER, G. B. [1978] *Considerations for Pulse-Doppler Radar Observations of Severe Thunderstorms*, Journal of Applied Meteorology, 17 No. 2, February 1978, American Meteorological Society.
- FABRY, F. [2015] *Radar Meteorology – Principles and Practice*, Cambridge University Press, University Printing House, Cambridge United Kingdom.
- GOSSARD, E. E. and STRAUCH, R. G. [1983] *Radar Observation of Clear Air and Clouds*. Elsevier, New York, United States of America, 280 pages.

- HITSCHFELD, W. and BORDAN, J. [1954] *Errors Inherent in the Radar Measurement of Rainfall at Attenuating Wavelengths*, Journal of Meteorology, **11**, February 1954, American Meteorological Society.
- HOLLE, R. L. and LOPEZ, R. E. [1993] *Overview of real-time lightning detection systems and their meteorological uses*. NOAA Technical Memorandum ERL NSSL-102, National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, United States of America, p. 68.
- IEEE [2002] *IEEE Standard Letter Designations for Radar Frequency Bands*, IEEE New York, United States.
- PALMER, R. and ISOM, B. [February 2006] *Mitigation of Wind Turbine Clutter on the WSD88D Network*. School of Meteorology. University of Oklahoma, Radar Operations Center Presentation.
- RHEINSTEIN, J. [1968] *Backscatter from Spheres: A Short Pulse View*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **AP16**, No. 1, January 1968.
- SIRMANS, D. *WSR-88D Antenna Polarization Change*, Titan Corporation, report to the WSR-88D Operational Support Facility, January 15, 1993, available from the WSR-88D Radar Operations Center.
- RYZHKOV, A. and ZRNIC, D. [2005], *Radar Polarimetry at S, C, and X Bands Comparative Analysis and Operational Implications*, 32nd Conference on Radar Meteorology, American Meteorological Society.
- SKOLNIK, M., [1990] *Radar Handbook*, Ch. 6, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, United States.
- ZRNIC, D. S., KENNAN, T., CAREY, L. D and MAY, P. [2000] *Sensitivity Analysis of Polarimetric Variables at a 5-cm Wavelength in Rain*, Journal of Applied Meteorology, **39**, September 2000.

ITU-R texts

- Recommendation ITU-R F.699-7 – Reference radiation patterns for fixed wireless system antennas for use in coordination studies and interference assessment in the frequency range from 100 MHz to about 70 GHz
- Recommendation ITU-R F.1245-2 – Mathematical model of average and related radiation patterns for line-of-sight point-to-point fixed wireless system antennas for use in certain coordination studies and interference assessment in the frequency range from 1 GHz to about 70 GHz
- Recommendation ITU-R M.1652-1 – Dynamic frequency selection in wireless access systems including radio local area networks for the purpose of protecting the radiodetermination service in the 5 GHz band
- Recommendation ITU-R M.1849-1 – Technical and operational aspects of ground-based meteorological radars
- Recommendation ITU-R RS.515 – Frequency bands and bandwidths used for satellite passive sensing
- Recommendation ITU-R RS.577 – Frequency bands and required bandwidths used for spaceborne active sensors operating in the Earth exploration-satellite (active) and space research (active) services
- Recommendation ITU-R RS.1166 – Performance and interference criteria for active spaceborne sensors
- Recommendation ITU-R RS.2017 – Performance and interference criteria for satellite passive remote sensing

参考书目

- BROOKNER, E. (Ed.) [1988] *Aspects of Modern Radar*. Artech House, Boston, United States of America.
- DIBBERN, J., MONNA, W., NASH, J. and PETERS, G. (Ed.) [March 2000] COST Action 76. Development of VHF/UHF wind profilers and vertical sounders for use in European observing systems, Final Report. European Commission, Directorate-General Science, Research and Development.
- DOVIAK, R. J. and ZRNIC, D. S. [1993] Doppler radar and weather observations. Academic Press, Inc., San Diego, United States of America.
- DOVIAK, R., ZRNIC, D. and SIRMANS, D. [November 1979] Doppler Weather Radar. Proc. IEEE, Vol. 67, 11.
- ECC Report 90 – Compatibility of wind profiler radars in the Radiolocation Service (RLS) with the Radionavigation Satellite Service (RNSS) in the band 1 270-1 295 MHz.
- ELACHI, DR. C. *Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques*. IEEE Press, New York, United States of America.
- Elena SALTIKOFF, John Y. N. CHO, Philippe TRISTANT, Asko HUUSKONEN, Lynn ALLMON, Russell COOK, Erik BECKER, and Paul JOE "The threat to weather radars by wireless technology" Bulletin of the American Meteorological Society, July 2016.
- HOBAN, N. P., CUNNINGHAM, J. G. and Zittel, D. W. [2014] *Estimating Systematic WSR-88D Differential Reflectivity (ZDR) Biases Using Bragg Scattering*, 30th Conference on Environmental Information Processing Technology, American Meteorological Society.
- Intercomparison of Techniques to Correct for Attenuation of C-Band Weather Radar Signals. J. Applied Meteorology: Vol. 37, 8, p. 845-853.
- KAWASAKI, Z. I., YAMAMOTO, K., MATSURA, K., RICHARD, P., MATSUI, T., SONOI, Y. and SHIMOKURA, N. [1994] *SAFIR operation and evaluation of its performance*. Geophys. Res. Lett., Vol. 21, 12, p. 1133-1136.
- LAW, D. et al. [March 1994] Measurements of Wind Profiler EMC Characteristics, NTIA Report 93-301, 63 pages. National Telecommunications and Information Administration.
- LEE, A. C. L. [1986] *An experimental study of the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique*. Quarterly J. R. Meteorological Society.
- LENNON, C. and MAIER, L. [1991] *Lightning mapping system. Proc. of International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity*, Cocoa Beach, FL., United States of America. NASA Conf. Pub. 3106, Vol. II, p. 89-1, 89-10.
- MAMMEN, T. [1998] Weather radars used by members, WMO instruments and observing methods, Report No. 69.
- MCLAUGHLIN, D. J., CHANDRASEKAR, V., DROEGEMEIER, K., FRASIER, S., KUROSE, J., JUNYENT, F., PHILIPS, B., CRUZ-POL, S. and COLOM, J. [January 2005] Distributed Collaborative Adaptive Sensing (DCAS) for Improved Detection, Understanding, and Prediction of Atmospheric Hazards. Ninth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), American Meteor. Society.
- PROBERT-JONES, J. R. [1962] *The Radar Equation in Meteorology*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 88.
- SESSIONS, W. B. [December 1995] SARSAT SARP instrument performance when receiving emissions from NOAA 404 MHz wind profiler radars, NOAA, NESDIS, E/SP3, 87 pages.
- SKOLNIK, M. [1990] Radar Handbook. Second Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, United States of America.
- WMO Guide to meteorological instruments and methods of observation, No. 8, World Meteorological Organization.

附件1

气象学中常用的首字母和缩写

A		AVCS	先进视频摄影系统
A/D	模拟—数字	AVHRR	先进甚高分辨率辐射计
AAAS	美国科学促进协会	AWIPS	先进天气信息处理系统
AARS	机载观测资料自动发送系统	B	
ABSN	南极基本天气观测站网	BCD	二—十进制
ACARS	飞机通信寻址与报告系统	BER	误码率
ACCAD	气候应用和数据顾问委员会	BPS	比特/秒
ACMAD	非洲气象应用促进发展中心	BPSK	二进制移相键控法
ADAS	机载数据采集系统	BR	国际电联无线电通信局
ADC	模拟/数字转换器	BW	带宽
ADEOS	先进地球观测卫星（日本）	C	
ADP	自动数据处理	C/N ₀	载噪密度比
ADPE	自动数据处理设备	C&DH	指令与数据处理
AFC	自动频率控制	CaeM	航空气象委员会
AFOS	自动预测和观测系统	CAgM	农业气象学委员会
AGC	自动增益控制	CAS	大气科学委员会
AGRHYMET	农业气象学和业务水文学及其应用	CBS	基本系统委员会
	区域培训中心	CCD	电荷耦合器件
AIRS	先进红外探测器（NASA仪器）	CCIR	国际无线电咨询委员会 （见ITU-R）
ALC	自动电平控制	CCI	气候学委员会
AM	调幅	CCRS	加拿大遥感中心
AMDAR	航空器气象资料下传	CCSDS	空间数据系统咨询委员会
AMI	美国气象学会	CDA	指令和数据收集
AMSR	先进气象温度探测器	CDAS	指令与数据收集站
ANSI	美国国家标准学会	CEOS	地球观测卫星委员会
AOPC	气候大气观测专门委员会	CERES	云和地球辐射能量系统
AOS	信号采集	CGMS	气象卫星协调小组
APT	自动图象传送	CHy	水文学委员会（WMO）
ARGOS	NOAA系列卫星数据收集和 定位系统	CIESIN	国际地球科学信息网络集团
ASCII	美国信息交换标准码	CIMO	观测仪器和方法委员会
ASIC	专用集成电路	CIMSS	气象卫星研究合作机构
ATMS	先进技术微波探测器 （NPOESS/NASA）	CLICOM	气候计算
ATOVS	先进TIROS业务垂直探测器	CLINO	气候平均值
ATSR	沿轨扫描辐射计	CLIPS	气候信息和预报服务

C (续)

CLIVAR	气候变异与预	DBMS	数据库管理系统
CMA	中国气象局	DCPLS	数据收集和定位系统
CMD	指令	DCP	数据采集平台
CMIS	圆锥扫描微波成像仪/探测仪 (NPOESS仪器)	DCPI	数据采集平台询问
CMM	航海气象委员会	DCPR	数据采集平台接收
CNES	法国空间研究中心	DCR	微分关联辐射计
CNIE	国家空间调查委员会	DCS	数据采集系统
COADS	海洋大气综合数据集	DEMUX	信号分离器
CONUS	美国本土	DIFAX	数字传真
COP	缔约方大会	DIR	日间红外
COPUOS	和平利用外层空间委员会	DLI	下行干扰 (DM/PM)
CORSSAC	民用业务遥感卫星顾问委员会	DLM	下行监测
COSPAS	俄罗斯的一个卫星搜救系统。 见SARSAT	DLR	德国航天局 (Deutsche Zentrum für Lüft- und Raumfahrt)
CPCSA	气候项目协调和支持活动	DMSP	国防气象卫星计划
CPR	云物理辐射计或心肺复苏	DN	降交点
CPU	中央处理器	DOMSAT	国内 (通信) 卫星
CRC	循环冗余校验/C循环冗余码	DPT	数字云图终端
CrIS	跨轨红外探测仪 (NPOESS 仪器)	DR	直接接收
CrMIS	跨轨微波成像仪-探测仪 (NPOESS 仪器)	DRGS	直收地面站
CRT	电子射线管	DS	驻留探测或探测 (GOES-4/ 7 VAS 操作节点)
CSA	加拿大航天局	DSARS	DAMUS卫星存档和检索系统
CS&C	通信交换和控制 (GMACS系统的 CDA部分)	DSB	直接探测仪信标
CSIRO	澳大利亚联邦科学与工业研究 组织	DSB	直接探测仪广播
CSIS	集中式风暴信息系统	DSN	深空网
CSM	气候系统监测	DUS	数据利用系统
CSMA/CD	带有冲突监测的载波侦听多址访问	E	
CSTR	科学技术研究委员会	EBR	电子束记录器
CTCS	CDA测控系统 (GIMTACS系统的 CDA部分)	EC/AGE	气象和电子标定交换执行理事会顾 问组
CW	连续波	ECMWF	欧洲中期天气预报中心
CZCS	海岸带彩色扫描器	EDC	EROS数据中心
D		EDIMS	环境数据和信息管理系统
D/A	数字-模拟	EES	地球探测卫星
DAAC	分布式动态存档中心	EESS	卫星地球探测业务
DADS	数据存档和分发系统	EIRP	等效全向辐射功率
DAPS	DCS自动处理系统	EIRPSD	等效全向辐射功率谱密度
DAS	数据采集系统	ELT	紧急定位发射器
DAS	数据库管理系统	ELV	一次性使用运载火箭
DAS	直接存取系统	EMC	电磁兼容
dB	分贝	EMI	电磁干扰
DB	直播	ENSO	厄尔尼诺-南方涛动
		ENVISAT	环境卫星
		EOS	地球观测卫星
		EPIRB	紧急无线电示位标

E (续)

EPOCS	赤道太平洋气候研究
EPS	高能粒子传感器
ERB	地球辐射收支
ERBE	地球辐射收支试验
ERL	环境研究实验室
EROS	地球资源观测卫星
ERS	ESA遥感卫星
ESA	欧洲航天局 (欧空局)
ESD	静电放电
ESMR	电子扫描微波辐射计
ETA	预计到达时间
ETM	工程测试模式
ETM	增强型专题绘图仪
ETS	工程试验卫星
EUMETSAT	欧洲气象卫星应用组织
EUV	远紫外
F	
FAX	传真
FC	假色
FCC	假彩色合成
FCC	联邦通信委员会
FDM	频分复用
FFT	快速傅里叶变换
FIFO	先进先出
FM	调频
FOV	视场
fps	每秒帧数
FSK	移频键控
FSS	卫星固定业务
FSS	飞行计划软件系统
G	
GAC	全球覆盖
GAME	全球能量与水循环亚洲季风试验
GARP	全球大气研究计划
GARS	GOES档案和检索系统
GAW	全球大气监测
GCIP	GEWEX大陆尺度国际项目
GCM	大气环流模式
GCOS	全球气候观测系统
GDTA	法国航天航空工业集团
GEO	静止地球轨道
GEWEX	全球能量和水循环试验
GHz	千兆赫、吉赫
GIMGSP	地球静止轨道环境业务卫星I-M地面系统项目
GIMTACS	地球静止轨道环境业务卫星I/M测控系统

GIS	地理信息系统
GMACS	地球静止轨道环境业务卫星监控系统 (现有的GIMTACS)
GMDSS	全球海上遇险和安全系统
GMS	对地静止气象卫星
GMT	格林威治标准时间
GNSS	全球导航卫星系统
GOES	对地静止业务环境卫星
GOMS	对地静止业务气象卫星
GOOS	全球海洋观测系统
GOS	全球观测系统
GOSSP	全球观测系统空间专门委员会
GPCP	全球降水气候学项目
GPS	全球定位系统
GPSOS	GPS掩星传感器
GRC	戈兰 (Glenn) 研究中心, 即原路易斯研究中心 (LeRC)
GRS	地面接收站
GRT	GOES实时 (数据库)
GSFC	戈达德太空飞行中心
GSN	全球气候观测系统地面网
GSTDN	航天器地面跟踪和数据网络
G/T	天线增益与系统噪声温度之比值 (dB/K)
GTOS	全球陆地观测系统
GTS	全球电信系统
GUAN	全球气候观测系统高空网
GVAR	GOES变量
GWC	全球气象中心
H	
H1/3	有效波高
HEPAD	高能质子和 α 粒子探测器
HiRID	高分辨率云图数据
HIRS	高分辨率红外探测器 (TIROS仪器)
HOMS	水文业务多目标系统
HRD	飓风研究日
HRD (10)	飓风研究日- GOES-East卫星在选定时间每隔10分钟扫描一次。
HRIS	高分辨率红外探测器, 或高分辨率干涉仪探测器
HRPT	高分辨率云图传输
HRSD (S)	飓风快速扫描日 (立体) GOES-East和West卫星每隔7 1/2扫描一次
I	
I/O	输入输出
I/S	成像仪和探测器

I (续)

IAHS	国际水文科学协会
IAMAS	国际气象学和大气科学协会
IASI	干涉式红外大气探测仪
ICES	国际海洋开发委员会
ICSAR	国际搜救委员会
ICSU	国际科学联盟理事会
IEEE	电气电子工程师学会
IF	中频
IFOV	瞬时视场
IFRB	国际频率登记委员会 (参见BR)
IGBP	国际地圈-生物圈计划
IGF	图像生成设施
IGFOV	瞬时视场角
IGOSS	综合性全球海洋服务系统
IHP	国际水文计划
INDOEX	印度洋试验
INPE	空间研究院
INR	图像导航和注册
INR	干扰和噪声比
INSAT	印度卫星
IOC	政府间海洋学委员会
IODE	国际海洋资料与情报交换
IPCC	政府间气候变化专门委员会
IPD	射频检测器 (CDA)
IR	红外
IRIG	美国靶场仪器组码
IRIS	红外干涉光谱仪
IRS	印度遥感卫星
IRU	惯性基准装置
ISSETAP	政府间科学工程和技术顾问专门委员会
ISO	国际标准化组织
ITOS	增强型TIROS业务系统
ITPR	红外温度廓线辐射计
ITU	国际电信联盟
ITU-R	国际电联无线电通信部门 (原CCIR和IFRB)
J	
JDIMP	GCOS/GOOS/GTOS数据管理和信息联合专门委员会
JERS	日本地球资源卫星
JIC	冰研究联合中心
JMA	日本气象厅
JPL	喷气推进实验室
JSC	约翰逊航天中心联合科学委员会

JSTC	科学和技术联合委员会
K	
K	绝对温标
kbit	千比特
kB	千字节
kbit/s	千比特每秒
keV	千电子伏特
kHz	千赫
KSC	肯尼迪航天中心
KSPS	千采样点每秒
L	
LANDSAT	美国地球遥感卫星
LANDSAT-TM	Landsat卫星专题制图仪
LaRC	兰利研究中心
LAT/LON	纬度/经度
LE	陆标抽取
LEO	近地轨道
LEOP	发射和第二次早期轨道阶段
LeRC	见GRC
LGSOWG	LANDSAT地面站操作工作组
LHCP	左圆极化
LIDAR	激光雷达
LMT	地方标准时
LOS	信号损耗
LPA	低功率放大器
lpi	每英寸行
lpm	每分钟行数
LRIT	低速率信息传输
LRPT	低分辨率云图传输
LUT	查找表或本地用户终端
LW	长波
LWIR	长波红外
M	
mb	毫巴
Mbit/s	每秒兆比特
MB/s	每秒兆字节
MCC	任务控制中心
MCDW	世界气候资料月报
MCS	湿度频道支持
MDHS	气象数据处理系统
MDUS	中型[卫星]数据使用站
MEO	中地球轨道
MEPED	中等能量质子电子探测器
MetAids	气象辅助

M (续)

METEOSAT	欧洲对地静止气象卫星	NRSA	国家遥感局
METOP	欧洲极轨气象卫星	NRZ	不归零制
MetSat	气象卫星	NRZ-L	电平不归零制
MeV	兆电子伏特	NSSFC	国家强风暴预报中心
MeV/n	每核子兆电子伏特	NSSL	国家强风暴实验室
MHS	微波湿度计	nT	纳特斯拉, 磁场强度的测量单位
MHz	兆赫	NWP	数值天气预报
MLS	微波临边探测器	NWS	国家气象局
MODEM	调制/解调	O	
MODIS	中分辨率成像光谱仪 (NASA仪器)	O&M	运营和维护
MOPITT	对流层污染测量仪 (NASA)	OAD	轨道和姿态确定
MOS	海洋观测卫星 (日本)	OAR	海洋及大气研究处
MPERSS	海洋污染紧急反应支持系统	OCTS	海洋水色水温传感器
mr	毫弧度	OHP	业务水文计划
MSFC	马歇尔航天飞行中心	OMI	臭氧测量仪器
MSI	多光谱成像仪	OMPS	臭氧成图和廓线仪装置 (NPOESS)
MSS	卫星移动业务	OOPC	海洋观测气候专门委员会
MSS	多光谱扫描器	OQPSK	偏移四相相移键控
MSU	微波探测装置	P	
MTBF	平均故障间隔期	P/SEC	每秒脉冲数
MTF	调制传递函数	P-P	峰间值
MUX	多路器	PA	功率放大器
MW	动量轮、中波、微波兆瓦	PAM	脉冲振幅调制
N		PCM	脉冲编码调制
N/S	北/南	PDL	处理器数据载入
NASA	美国国家航空航天局	PDR	处理数据中继 (GVAR射频链路)
NASCOM	NASA通信网	PE	原始方案
NASDA	日本国家宇宙开发事业团	PEP	峰值包络功率
NCDC	国家气候数据中心	PEP	多项错误保护 (NASA)
NE-delta-N	等效噪声辐射差	PFD	功率通量密度
NE-delta-T	等效噪声温度差	Pixels	像素
NERC	国家环境研究委员会	PKM	近地点发动机
NESDIS	国家环境卫星数据信息服务	PLL	锁相环路
NF	噪声系数	PM	调相
NHC	国家飓风中心	PN	伪随机
NHS	国家水文局	POES	极轨业务环境卫星
NIR	夜用红外, 或近红外	PPM	百万分之几
NMC	国家气象中心	PPS	每秒脉冲数
NMS	国家气象或水文气象局	PR	测雨雷达
NNODS	NOAA/NOSS海洋数据系统	PRF	脉冲重复频率
NOAA	国家海洋和大气局	PROFS	地区观测和预报服务项目
NOAA	极轨METSAT	PROMET	提供气象信息工作组
NOS	国家海洋测绘局	PSK	移相键控
NPOESS	国家极轨业务环境卫星系统	PWM	脉宽调制
NRCT	泰国国家研究委员会		
NROSS	海军海洋遥感系统		

Q					
QC	质量控制			SDUS	小型[卫星]数据使用站
QPSK	正交相移键控			SeaWiFS	宽视场海洋观测传感器
R				SEC	秒
R	雷利			SEM	空间环境监测器
RA	雷达高度计			SEU	单粒子翻转
R/Y	滚动/偏航			SGLS	太空地面链接系统
R&D	研发			SIGWX	重要天气
RBSN	区域基本天气观测站网			SIR	航天飞机成像雷达
RCS	反作用控制系统			SIRS	卫星红外光谱仪
RF	射频、无线电频率			SIT	CEOS战略实施小组
RFI	无线电频率干扰			SLAR	机载侧视雷达
RGB	红绿蓝、三原色			SN	空间网络
RH	相对湿度			SNR	信噪比
RHCP	右圆极化			SOCC	航天器操作控制中心
RMDCN	区域气象数据通信网络			SOES	环境业务卫星分委会
RMS	均方根			SOLAS	国际海上人命安全公约
RPM	每分钟转数			SPM	太阳质子监视仪
RSS	平方根之和			SPOT	斯波特（地球观测卫星）
RSU	遥感组件			SQPSK	交错四相相移键控
RT	实时			SPREP	南太平洋区域环境方案
RW	反作用轮			SR	扫描辐射计
RWA	反作用轮			sr	球面度
S				SR-IR	扫描辐射计-红外线通道
S/C	航天器			SR-VIS	扫描辐射计-可见光通道
S/N	信噪比			SSA	WWW系统支持活动
S/N ₀	信噪密度比			SSM/I	专用微波成像仪
S-VAS	展宽可见和红外自旋扫描辐射计大气探测仪			SST	海表面温度
S-VISSR	展宽可见红外自旋扫描辐射计			SSU	平流层探测器
SAD	探测器/辅助数据			STA	科技机构
SAGE	对流层云雾及气体实验			STC	科学技术委员会
SAR	合成孔径雷达或搜救			Ster	球面度
SARSAT	卫星辅助搜救跟踪；见COSPAS			STS	空间运输系统
SATCOM	卫星通信			SW	短波
SBUV	日光反向散射紫外线			SW	交换
SC/N ₀	副载波噪声密度比			SWIR	短波红外线
SC/OMS	业务气象卫星分委会			SXI	太阳X射线成像仪
SC/OES	业务环境卫星分委会			SXT	太阳X射线望远镜（Solar-A，即阳光卫星航天飞行）
SCHOTI	国家气象局培训机构领导人协调委员会			T	
SCIAMACHY	大气制图扫描成像吸收光谱仪			T/P	TOPEX/Poseidon卫星
SCO	副载波振荡器			T/V	热真空
SCSMEX	南海季风试验			T&C	测控
				TBUS	用于星历表数据讯息的4字母标志符

T (续)

TDM	时分复用
TDRS	中继卫星
TDRSS	中继卫星系统
TED	能量探测器, 或防止误捕海龟装置
TEMS	陆地生态监测系统
TES	对流层发射光谱计
TIP	TIROS信息处理机
TIR	热红外
TIROS	电视与红外观察卫星(泰罗斯卫星)
TLM	遥测
TM	专题制图仪
TMI	TRMM卫星微波成像仪
TMR	Topex卫星微波辐射计
TO	转移轨道
TOGA	热带海洋与全球大气
TOPC	陆地观测气候专门委员会
TOMS	臭氧总量绘图系统
TOS	TIROS业务系统
TOVS	TIROS业务垂直探测器
TRMM	热带降雨测量卫星
TRUCE	热带城市气候实验
TT&C	测控
TV	热真空, 或电视
TVM	透明VAS模式
U	
UHF	超高频
UNEP	联合国环境规划署
μrad	微弧度
μs	微秒
UTC	协调世界时
UV	紫外
V	
VAS	可见光和红外自旋扫描辐射仪(VISSR)大气探测器
VCP	自愿合作计划
VDB	VISSR数据库
VDUC	VAS数据使用中心
VHF	甚高频
VIIRS	可见光红外成像辐射仪(NPOESS仪器)
VIP	VAS图像处理器(带P/DU现有SPS)
VIRGS	VISSR图像配准和网格化系统
VISSR	可见光红外自旋扫描辐射计

VOS	自愿观测船
VREC	甚分辨率辐射计数据记录仪
VSWR	电压驻波比
VTPR	垂直温度剖面仪
W	
WAFC	世界区域天气预报中心
WCASP	世界气候应用与服务计划
WCDA	瓦拉普斯(Wallops)指挥和数据采集(站)
WCDMP	世界气候数据和监测计划
WCFP	世界气候资料计划
WCP	世界气候计划
WCRP	世界气候研究计划
WDC	世界数据中心
WEFAX	气象传真
WHYCOS	世界水文循环观测系统
WMO	世界气象组织
WRC	世界无线电通信大会
WSFO	气象服务预报单位
WSFO-Tap	中继GOES数据的WSFO地面通信链路
WWRP	世界天气研究计划
WWW	世界天气监视网
WX	天气
X	
XBT	一次性海水测温仪
XRI	X射线成像仪
XRS	(太阳)X射线传感器
Y	
yr	年
Z	
Z	格林威治标准时间或世界时的一般缩写

国际电信联盟
Place des Nations
1211 Geneva 20
Switzerland

ISBN 978-92-61-24885-7 SAP id
4 1 4 2 6
9 789261 248857



瑞士印刷
2017年，日内瓦
图片鸣谢：Shutterstock