

气象用无线电频谱手册： 天气、气候、水和相关环境应用 2026 年版





气象用无线电频谱手册：

天气、气候、水和相关环境应用

2026年版
无线电通信局



注

国际电信联盟和世界气象组织出版物中使用的名称以及本出版物中材料的呈现方式，不代表国际电信联盟和世界气象组织对任何国家、领土、城市或地区或其当局的法律地位，或对其边界的划界表达任何意见。

国际电信联盟和世界气象组织出版物中表达的观点系作者本人的观点，不一定反映国际电信联盟和世界气象组织的观点。提及具体公司或产品并不意味着国际电信联盟和世界气象组织认可或推荐这些公司或产品，而不推荐其他未被提及或未做广告的同类公司或产品。

编辑通信以及部分或全部出版、复制或翻译本出版物的请求，请寄至：

Chairperson, Publications Board
World Meteorological Organization (WMO)
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

国际电信联盟（ITU）
978-92-61-40685-1（电子版）

世界气象组织（WMO）
WMO-No. 1197
978-92-63-11197-5（电子版）

© WMO-ITU 2026

国际电信联盟和世界气象组织保留以印刷、电子及任何其他形式和任何语言出版的权利。未经国际电信联盟和世界气象组织事先书面许可，不得以任何方式复制本出版物的任何部分。

前言

第七无线电通信研究组（科学业务组）于1990年杜塞尔多夫CCIR全会机构改革期间设立。

第7研究组下设四个工作组（WP），负责处理科学业务范畴内各专业学科的技术问题。气象及相关环境活动属于第7C工作组（WP 7C）的职责范围。WP 7C开展有关地基和天基平台气象无源与有源传感器以及气象辅助设备（主要为无线电探空仪和空间天气传感器）的实施、运行方面的研究。由于气象业务还依赖无线电通信来收集其预测所依据的数据，并向公众处理和分发由此产生的天气信息和预警，因此此项活动也涉及WP 7B。此外，气象雷达和风廓线雷达归属第5B工作组，在一般无线电定位业务项下进行研究。

在实现联合国可持续发展目标（SDG）的框架内，地球观测和气象系统被赋予了特殊角色。它们对实现可持续发展目标既有直接贡献，也有间接贡献。此外，利用无线电频率所获取的数据对于监测所采取的调整行动的结果至关重要。为监测这些活动的进展而制定的232项指标中，有30项只能利用遥感卫星获取的数据进行评估。

气象是我们日常生活的重要组成部分，与我们的日常起居和活动有着广泛联系。可靠的天气预报是安全和经济的关键。为帮助挽救生命并减少风暴、强降水、热浪和热带气旋造成的生命财产和基础设施损失 – 以及受天气影响的其他灾害，如洪水或大气或海洋污染物的扩散 – 全球公众和决策者需要基于可靠天气预报的及时预警。

与天气和气候相关的极端事件正造成日益增加的经济损失。准确及时的天气预报对于支持业务连续性和保护经济的重要性也在同步增长。能源、交通、建筑、农业、旅游和公用事业等部门尤其如此。例如，能源供应商依赖天气预报来预判电力需求，并在高温和寒潮期间调整其生产。随着可再生能源的发展，生产本身将日益依赖天气。同样，雾、雪、大风、雷暴和天气引起的火山灰颗粒扩散的预报对于航空和空中交通管理至关重要，并由此延伸至全球经济。

制定ITU-R建议书和筹备世界无线电通信大会（WRC）是研究组活动的主要重点。第7研究组的专家们有着明确的需求，需要将这些信息不仅与那些工作依赖于气象及相关环境数据以提高天气和气候预测准确性的同行分享，还要与政策制定者和频谱管理者分享，使其了解将特定频率用于气象及相关环境目的的重要性以及保护这些频率的方法，从而确保以尽可能高的可靠程度维持地球系统模拟和预测能力的连续性。

因此，决定与世界气象组织（WMO）无线电频率协调专家组（ET-RFC）合作编写并出版本手册，以便气象及相关环境数据的所有用户能够更全面地了解气象系统。本手册的一个主要目的是向读者提供世界各地气象工作者和其他对环境活动感兴趣的科学家使用无线电系统和无线电频率（RF）频段的相关信息，以及此种使用对公共安全和世界经济的重要性。

对已分配频段进行有效和审慎的管理，对于维持和提高天气及相关天气预报的质量和准确性至关重要。例如，必须认识到，如果目前分配给气象用途的某些频段被与气象无线电系统不兼容的其他无线电系统占用，则这些频段可能变得无法用于天气、气候和/或灾害预测系统，从而使相应的天气预报即使并非完全不可能，也将极难以达到所要求的可靠度和准确度。

作为第7研究组主席，我很荣幸向气象及相关环境数据用户群体以及频率管理界同仁奉献本手册，我相信他们将视其为自身工作中的一部重要参考工具。

本手册的更新离不开参与第7研究组和WMO ET-RFC的众多贡献者。为感谢他们对此项工作的宝贵贡献和领导作用，特此向WMO的Natalia Donoho、Jesse Andries、Zoya Andreeva、David Franc（美国）、Alec Casey（加拿大）、Eric Allaix（法国）、Kirsty McBeath（英国）、Philippe Tristant（欧洲气象卫星应用组织）和Bruno Espinosa（WP 7C主席）致以特别感谢。

此外，向来自世界各地的众多贡献者致以特别感谢，希望没有遗漏任何人：

来自中国的NIE Jing、JIN Yuyan和LI Yingchong，

来自俄罗斯联邦的Sergey Uspensky和Anton Stepanov，

来自美国的Edna Prado、Hui Shao、Daniel Gillies、Daniel Brewer、Gijs DeBoer、James Pinto和Tomasz Wojtaszek，

来自英国的Dawn Harrison、Debbie O'Sullivan、David Jackson、David Edwards、Graeme Marlton和Ben Pickering，

来自澳大利亚的Mohammad Zomorodi，

来自德国的Volker Lehmann、Marcus Pool和Dirk Brändlein，

来自瑞士的Alexander Hafele和Maxime Hervo，

来自芬兰的Annakaisa von Lerber、Juha Salmivaara和Matti Lehmuskero，

来自日本的Takahiro Mitome、Yasunori Iwana和Satoshi Hagiya，

来自加拿大的Robin Fiory和Peter Leibiuk，

来自巴西的Flávio Archangelo和Joaquim Eduardo Rezende Costa，

来自法国的Nicole Vilmer和Olivier Traullé，

来自荷兰的Roeland Van Malderen，

来自意大利的Nico Cimini，

来自欧洲空间局的Katharina Andersen和Yan Soldo，

来自欧洲中期天气预报中心的Bruce Ingleby，

以及支持此项活动的WMO的若干同事。

最后，我们还特别感谢无线电通信局的Vadim Nozdrin，他在本手册内容的更新和出版方面发挥了重要作用。

Markus DREIS
无线电通信第7研究组主席

目录

页码

前言	iii
引言	vii
第1章 – WMO全球基础设施	1
1.1 WMO全球基础设施的组成部分	1
1.2 WMO全球综合观测系统（WIGOS）	2
参考文献	11
第2章 – 气象卫星业务（MetSat）	13
2.1 气象卫星业务（MetSat）的定义及其频率划分	13
2.2 采用对地静止（GSO）卫星的MetSat系统	16
2.3 采用非GSO卫星的气象卫星系统	19
2.4 备选的数据播发机制	22
第3章 – 气象辅助业务	25
3.1 引言	25
3.2 气象辅助传感系统的示例	27
3.3 影响气象辅助设备系统特性的因素	31
3.4 气象辅助业务所需气象观测的特性	35
3.5 气象辅助设备业务操作的差异	36
3.6 未来趋势	38
参考文献	38
第4章 – 气象雷达	41
4.1 引言	41
4.2 天气雷达	43
4.3 风廓线雷达（WPR）	80
4.4 海洋学高频雷达	86
参考文献	87
第5章 – 用于气象及相关环境活动的 无源和有源航天遥感	89
5.1 引言	89
5.2 无源微波辐射测量	91
5.3 有源传感器	112

第6章 – 空间天气	123
6.1 空间天气定义及其相关无线电通信业务	123
6.2 空间天气观测	123
第7章 – 用于气象及相关环境活动的其他无线电通信系统	131
7.1 引言	131
7.2 数据分发系统	131
7.3 天气传感无人机系统	132
7.4 水文系统	132
7.5 全球导航卫星系统（GNSS）的气象用途	134
7.6 雷电探测系统	135
7.7 地基微波辐射计	138
7.8 微波无线电衰减系统	139
参考文献	140
附件 – 缩略语表	143
A.1 气象常用缩略语	143
A.2 本手册中使用的其它缩略语	150

引言

及时预警自然与环境灾害、精准开展气候预测，以及深入了解、保护并高效管理生物圈、矿产、水和能源等稀缺资源，是经济可持续发展的核心要求。天气、气候、水、环境状况及自然灾害相关信息对全球社会而言至关重要。监测活动所提供的关键信息，对于天气预报预测、气候变化科学、环境保护、（交通、能源、农业、城市发展、自然资源管理等领域）经济可持续发展，以及生命、生计与财产安全至关重要。需要明确的是，这类信息要么依托利用无线电（电磁波）的系统观测获取，要么由无线电通信系统完成采集、传输与分发。无线电系统是监测地球气候、助力各国减缓、适应气候变化影响并应对相关重大挑战的基础工具。任何依靠无线电频谱运行的系统，均在使用有限且稀缺的自然资源。保障各无线电频段免受有害干扰、持续可用，是各类对地观测系统发展的关键。

用于获取和分发该类信息的各类系统采用多种无线电技术，且需在整個无线电频谱范围内稳定使用无线电频率，工作中心频率覆盖数千赫兹（kHz）至数百吉赫兹（GHz）。此类系统运用多类技术，包括无线电通信（如无线电探空仪、卫星）、有源遥感（如气象雷达、风廓线雷达、降水雷达、云廓线雷达）以及无源遥感（如微波探测仪、微波辐射计、雷电探测设备）。空基与地基设备均服务于上述无线电通信、有源及无源探测系统。

上述无线电频率应用相互关联，共同构成一套完整的全球气象及相关环境监测体系。该体系内任何无线电相关设备（无论观测设备还是数据分发设备）性能受损，均会危及整个地球系统监测与预报流程。

同时需要着重说明，使用上述频率的各类系统在全球极端天气、气候及水状况的探测、预报与预警工作中发挥关键作用。此类灾害占全部有记录灾害总量的50%以上，因此该类系统是多灾种预警系统的核心组成部分，对减轻各类灾害与突发事件影响至关重要。

面向大众市场、具备增值功能的新型无线电应用不断发展，给气象及相关环境业务所用频段带来日益加剧的压力。未来存在限制此类业务开展的潜在风险。卫星无源遥感面临的风险尤为突出，该业务需在多个无线电频段测量强度极低的自然辐射。这些频段对多种地球物理变量敏感，且必须组合使用方可反演多种不同物理量。实现上述观测所需的无线电频率由基础物理规律决定，无法更改。依托该类频段开展连续观测，对气候变化监测与评估同样不可或缺。

无线电频谱的气象领域使用者必须保持警惕，主动应对与其他无线电通信业务共享频谱所面临的日益严峻的挑战。第十九次世界气象大会（Cg-19，2023年6月，日内瓦）表示“对其他无线电通信服务的发展对划分给气象设备、气象卫星、地球探测卫星和无线电定位（天气雷达和风廓线雷达）服务的一些无线电频段造成持续的威胁表示严重关切”。鉴于气象及相关环境活动所需的特定无线电通信业务的极端重要性，Cg-19通过了决议31，向国际电信联盟（ITU）及其成员的管理部門发出呼吁：

- 1) 确保对无线电频段的获取和绝对保护，这些频段由于其特殊的物理特性，因而成为对大气和地表进行星载无源遥感探测的独特自然资源，并对天气、水和气候研究及业务至关重要；
- 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；
- 3) 根据上述吁请(1)和(2)，特别关注WMO关于世界无线电通信大会（WRC）议程的立场；

在此方面，历届WRC兼顾商用业务日益增长的频谱使用需求，作出多项重要决议以保障气象及相关环境业务运行，具体如下：

- WRC-15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。
- WRC-19为5GHz频段运行的气象雷达与辐射计建立了保护机制，出台保障数据收集系统（DCS）长期运行的适配规则，针对31至92GHz区间内与无源微波测量频段相邻的多个频段，对地面业务（含国际移动通信）和卫星业务的带外辐射作出限制；
- WRC-23进一步收紧18.7GHz、36.5GHz频段的无源微波传感器测量保护限制要求，为243GHz附近冰云观测的无源微波遥感新增频率分配，还通过定义空间天气、明确其业务属性及出台相关重要性决议，首次在《无线电规则》中正式认可空间天气相关业务。

结合此前《无线电规则》的相关修订进展，以及当前无线电技术的迭代变化，第7无线电通信研究组下属7C工作组（遥感系统）与WMO无线电频率协调专家组（ET-RFC）共同编制了这本修订版手册。本手册面向依托无线电系统获取气象及相关环境数据的专业用户、依赖这类系统的公众与政府部门，以及包含监管机构、无线通信行业在内的无线电通信领域从业者，为其提供参考指引。

该手册展示了WMO全球基础设施及其观测部分的总体结构，概述并讨论了每个气象和相关环境系统的技术和运行特性。对每个气象系统的描述包括：所用的无线电频带、预测来自竞争性无线电通信系统有害干扰的标准；以及有害干扰对天气、气候、水与相关环境数据、预报和警报的潜在影响。为协助理解该复杂领域，现将讨论分成以下系统类型：

- 1 WMO全球基础设施
- 2 气象卫星业务系统
- 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，包括天气雷达与风廓线雷达
- 5 用于气象及相关环境业务的星载无源、有源遥感系统
- 6 空间天气传感器系统
- 7 其他用于气象及相关环境业务的无线电通信系统

为方便读者查阅，本手册的附录部分还收录了缩略语简表与参考文献清单。

第1章

WMO全球基础设施

1.1 WMO全球基础设施的组成部分

天气、气候、水文及相关环境现象不受国界限制。为支撑高效天气预报、气候预测、水资源管理及各类相关环境服务，惠及全球社会，这类现象相关信息的近实时全球共享至关重要。

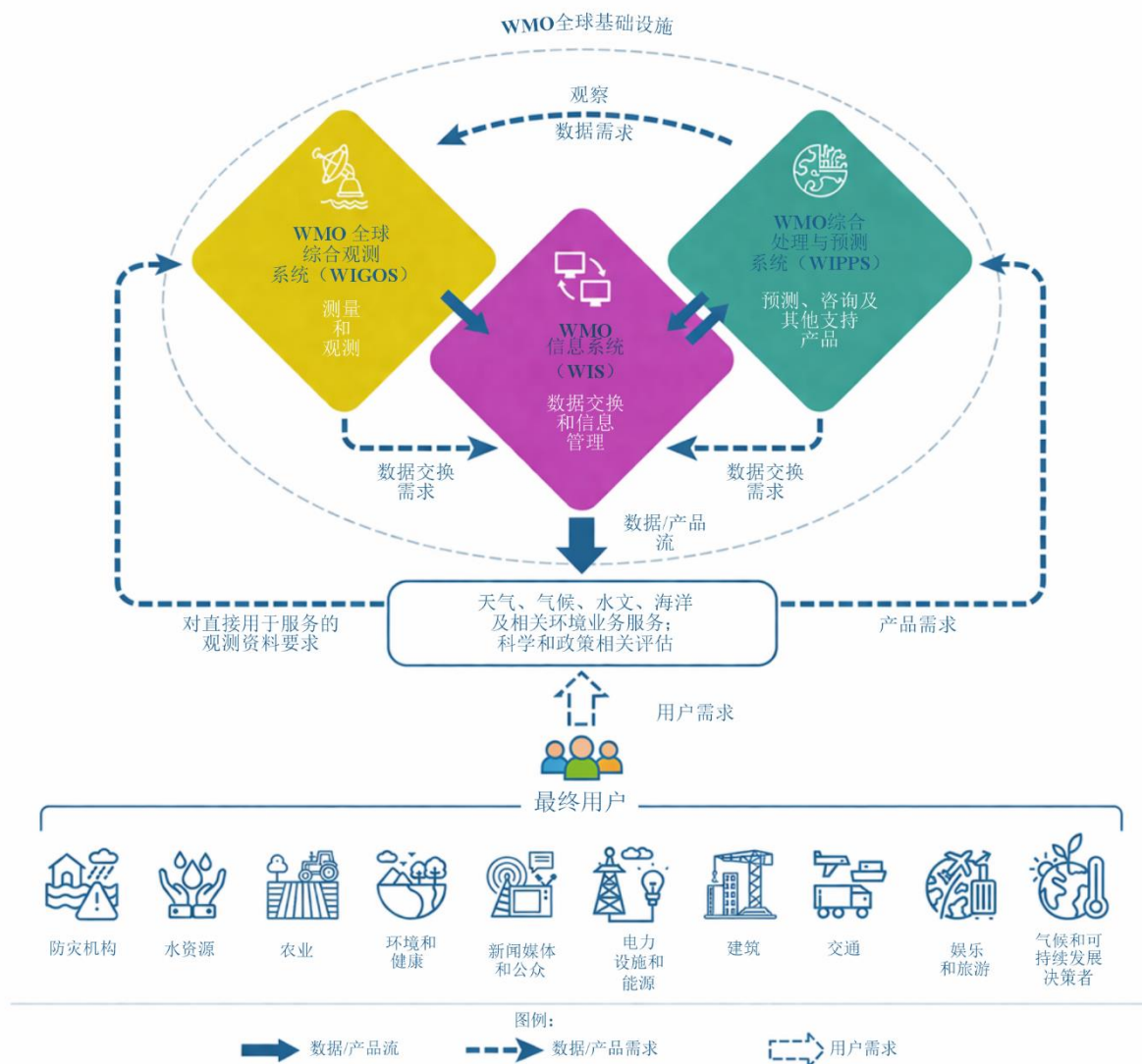
WMO全球基础设施由193个会员国和会员领地运行的观测系统、通信设施、数据处理与预测中心共同组成，可提供气象及相关环境信息，为全球范围内的相关服务提供支撑。

WMO全球基础设施由三大核心综合系统构成：（图1-1）：

- **WMO全球综合观测系统（WIGOS）** 提供来自全球各地及外层空间的天气、气候、水文及其他环境变量的高质量标准化观测数据。WIGOS由全球范围内WMO会员及合作机构所有并运行的大量地基、空基独立观测系统共同组成。
- **WMO信息系统（WIS）** 是一套协同运行的系统网络，用于共享天气、气候、水文及相关环境观测数据、产品和预警的权威信息。WIS支持发现检索WIGOS和WMO综合处理与预测系统（WIPPS）生成的数据。
- **WMO综合处理与预测系统（WIPPS）** 前身为全球数据处理与预报系统（GDPFS），是一套覆盖全球的网络，统筹各会员产出分析与预报产品的能力并向所有会员开放，支撑提供天气、气候、水文及相关环境服务。全球、区域、国家级WIPPS中心为这套网络提供支撑，保障WIPPS产品的提供与可访问性。

图1-1

WMO全球基础设施的组成部分



Meteo-01-01

1.2 WMO全球综合观测系统（WIGOS）

WIGOS为WMO所有观测系统、以及其在联合发起观测系统中的相关贡献搭建了全球框架，可支撑WMO的全部计划与活动，以此响应各类用户需求。WIGOS覆盖以下地球系统领域的观测体系：天气、气候、大气成分、水文、冰冻圈、海洋与空间天气[WMO-No. 1160]。

WIGOS的主要组成部分包括：

- 世界天气监视网（WWW）的观测组成部分，
- 全球大气监视网（GAW）的观测组成部分，
- 全球冰冻圈监视网（GCW）的观测组成部分，
- WMO水文观测系统（WHOS），
- 空间天气观测系统。

除此之外，WMO正与伙伴组织合作，依托全球气候观测系统（GCOS）和全球海洋观测系统（GOOS）分别补充气候监测能力与海洋观测能力，补充WIGOS框架的组成部分。

通过制定观测标准与建议，WIGOS支撑产出经过质量控制的产品与信息，保障天气、气候、水文、海洋及相关环境服务高效落地。如图1-2所示，WIGOS包含业务化运行与科研资助两类地基、空基子系统，在陆地、海洋、空中、太空全维度部署实体观测基础设施。

WIGOS最核心的价值在于通过监测、预报及提前预警各类灾害事件保障生命、生计与财产安全，相关灾害包括洪水、干旱、高温热浪、海啸、局地风暴、龙卷风、飓风、温带气旋与热带气旋等极端天气事件，以及太阳耀斑、地磁暴等空间天气事件，这类空间天气事件可能引发无线电中断、全球导航卫星系统（GNSS）性能衰减、大范围电网故障等严重危害。

公共卫生、减少灾害风险、水资源管理、粮食安全、可再生能源、旅游、保险及可持续发展等诸多经济领域，都能从提供精准预报中显著获益。极端事件的预警时长得到延长后，民政部门与应急响应人员可采取合理措施，保障民众安全。

图1-2

WMO全球综合观测系统（WIGOS）



1.2.1 天气观测

WMO全球基础设施最初以世界天气监视网（WWW）为载体搭建，用于满足用户对天气监测与预报的需求。WWW的观测组成部分可提供全球各地的气象观测数据，支撑天气分析、预报、咨询和预警产品制作，同时为WMO会员及伙伴组织开展的气候监测与相关环境活动提供支撑。

1.2.1.1 地表陆地观测

地基子系统的核心骨干由陆基站点构成，可观测地球表面及近地表的气压、风速风向、气温、相对湿度等气象参数。站点产出的数据可实现全球实时共享。其中部分地表站点还通过全球气候观测系统（GCOS）地表网，用于气候监测工作。

1.2.1.2 高空观测

随自由上升气球搭载的无线电探空仪，可从近地面直至30公里甚至更高的高度，完成压力、风速、温度、湿度的测量。由此构成覆盖全球的高空站点网络。海洋区域的探空观测主要来自航行于北大西洋、搭载船载自动高空探测设备的船舶。另有一批专门适配气候监测需求的高空站点，组成GCOS高空观测网。

1.2.1.3 天气与风廓线雷达观测

天气雷达的应用价值已得到充分验证，其可在较大范围内提供时空高分辨率数据，在大气低层观测中价值尤为突出。这类设备可用于降水的实时估算与短时预报。同时具备独有的观测能力，能观测强对流天气、热带风暴等多种强天气现象的发展过程。雷达产出的降水相关数据产品可支撑并提升暴雨的探测与预测。这些特性让天气雷达成为发布高影响天气及时预警的核心支撑系统。

除核心功能外，业务化天气雷达还可测量降水区域内的风场，对无线电探空仪、风廓线雷达等其他高空探测技术形成补充。此外，天气雷达系统采用双偏振技术后，后具备多项优势，包括但不限于提升降水相态识别能力、提高降雨量估算精度、全面改善雷达数据质量。天气雷达目前已成为各国和区域现代观测网络的关键组成部分。

风廓线雷达可提供从近地表到对流层高度的连续实时风向、风速廓线数据。这类廓线数据可补充无线电探空仪等其他高空风观测手段，是数值天气预报（NWP）系统的重要输入数据。和天气雷达不同，这类设备无需降水条件，通过探测空气折射率不均匀性产生的回波即可完成有效观测。这种晴空探测能力是这种雷达独有的核心特性。外次，风廓线雷达也可通过探测降水等其他目标的回波完成风场测量。

1.2.1.4 其他地基遥感观测

除天气雷达和风廓线雷达之外的地基遥感观测系统，普遍具备高时间分辨率与高垂直分辨率的数据输出优势，相比传统原位观测和廓线探测方法有着显著特点。以下是目前应用最广泛的几类地基遥感设备：

地基微波辐射计（MWR）属于无源遥感设备，可测量大气的热辐射，经后续处理可得到温度、湿度等大气要素廓线。这些数据可用于计算雷暴潜势及其他天气威胁的常用预报指数，以支撑气象业务人员开展工作，也可直接同化进NWP模式，提升预报质量。

无源闪电探测系统（LDS）通过分布式布设的地面传感器网络，实现对闪电活动的精准实时监测。它不仅能定位雷暴单体甚至单次闪电的位置，还可间接提供与雷暴伴生的暴雨、破坏性大风等其他强天气现象的高价值信息。LDS的探测精度、效率和覆盖范围取决于传感器的类型与数量。部分网络面向局地高精度三维闪电探测设计，而广域LDC可覆盖大陆尺度区域，甚至实现海洋上空的闪电监测。

激光探测与测距系统（常被称为激光雷达）属于有源遥感设备，依托激光发射，利用大气气体分子与粒子的散射完成观测。大气激光雷达包含差分吸收激光雷达（DIAL）、拉曼激光雷达、多普勒激光雷达等多个品类，不同类型的设备具备差异化的特性与测量能力。激光雷达可反演大气成分、云、水汽、风、温度等多种大气变量信息，广泛应用于空气质量监测、NWP、风廓线观测等多种应用场景。

除上述采用电磁辐射的地基遥感系统外，还有部分技术利用声波开展大气廓线探测。该领域的两类核心设备为声雷达（Sodar，声探测与测距）和无线电声学探测系统（RASS）。声雷达可对最低层大气的风廓线和热力结构进行精细测量。RASS则在此基础上进一步实现温度廓线定量观测。目前这两类设备主要应用于科研场景。

1.2.1.5 飞机气象观测

通过与合作航空公司、国际航空运输协会（IATA）及国际民用航空组织（ICAO）达成的工作安排，可从数千架飞机获取飞机气象观测数据，输出飞行过程中的压力、风、温度、湿度、湍流等多类参数报告。飞机气象数据中继（AMDAR）系统可在巡航高度，以及爬升、下降阶段的指定高度层完成气温、风向风速的高质量观测。近年来飞机观测数据量大幅增长，每日可产出超50万条AMDAR气象观测记录，覆盖全球数百座机场。在无线电探空资料稀缺乃至空白区域，该观测体系具备巨大观测潜力，为世界天气监视网高空观测提供重要支撑。

未来，WMO预计无人机系统（UAS）将成为飞机观测的另一大重要数据来源，其涵盖无人机等小型飞机及多类固定翼机型。UAS可广泛应用于气象、水文与气候监测多项业务。WMO正支持研究和推进UAS应用的相关工作，挖掘其测量气象参数的潜力，将其作为传统气球无线电探空仪的补充观测体系。

1.2.1.6 海洋表面观测

在海洋区域，观测数据可通过搭载在卫星、船舶、锚定浮标、漂流浮标及固定平台上的各类仪器获取。WMO自愿观测船计划招募的船舶所搭载的仪器，可观测到与陆地地面站点基本一致的气象要素，还额外覆盖海面温度、浪高、浪周期等要素。此外，业务化运行的漂流浮标计划共部署约1200个漂流浮标，可完成海面温度、海平面气压、表层海流、海表盐度的观测，并通过卫星实现观测数据的每小时回传。

1.2.1.7 气象卫星观测

空基气象观测由WMO会员的航天机构、运行气象与地球观测卫星的政府间机构所实施的卫星计划完成。各卫星运行方通过气象卫星协调组（[CGMS](#)）开展国际协同。

WIGOS的空基核心骨干部分包含：部署在三个轨道面的太阳同步低地球轨道（LEO）卫星星座、可实现极区外全域覆盖的地球静止轨道（GEO）卫星环带，同时辅以其他轨道面卫星、漂移轨道及大椭圆轨道卫星形成作为补充。

GEO可见光和红外（VIS/IR）成像可实现高频采样（次小时级或分钟级），对监测快速演变的现象至关重要，例如追踪云系、灾害性天气、火山喷发与森林火灾的移动和发展。仅需至少5颗卫星即可满足非极区高频成像需求，实现全球完整覆盖。业务化星座还需额外配置备份卫星，在最低配置基础上提供冗余保障。

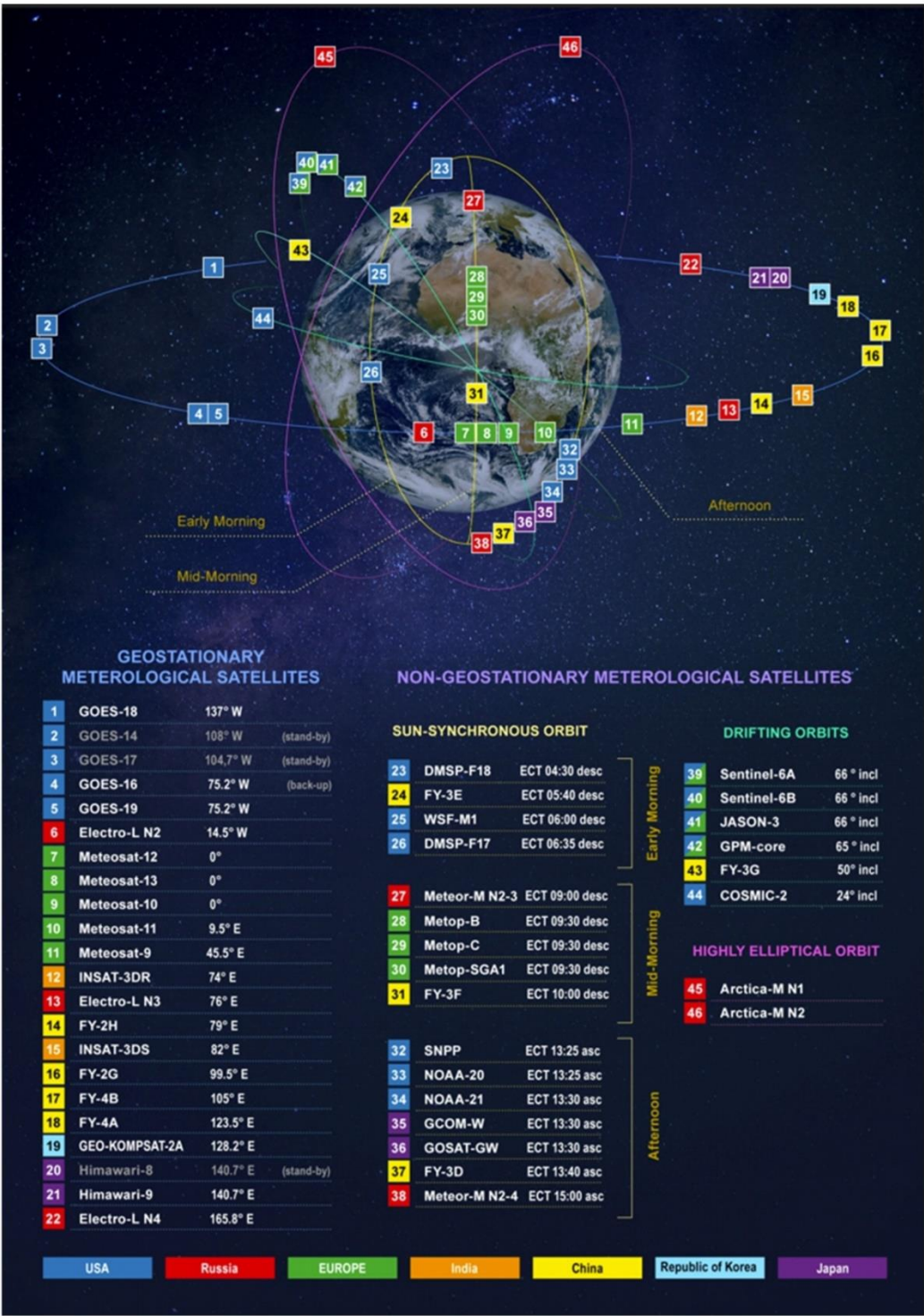
太阳同步轨道可覆盖全球，满足全球NWP、极地气象、气候学等应用需求。对于这类应用，全球覆盖度与高精度的优先级高于高频采样。太阳同步轨道及其他低地球轨道的额外优势在于，可在电磁波谱的微波（雷达）和光学（激光雷达）频段开展有源遥感探测，还能完成高层大气的临边探测。

随着NWP的改进，现已发展出成熟方法，可直接从卫星辐射率数据反演得到温湿度信息。近年来，天气与气候分析预报领域成果显著，针对暴雨、风暴、气旋等影响民生与经济的灾害性天气预警能力大幅提升。这一进展很大程度上得益于空基观测数据的普及，以及这类数据在NWP模式中的同化应用，显著提升了预报技能，进而延长了极端天气事件的响应提前期。

当前业务化运行的气象卫星概览如图1-3所示。

图1-3

WIGOS当前业务化气象卫星星座（状态：截至2026年3月）



Meteo-01-03

为保障空基气象观测的业务连续性，同代新型卫星或新一代气象卫星正持续接替当前在轨运行的卫星。除保障数据连续性外，观测能力大幅提升的新一代气象卫星，可为用户提供全新类型的观测数据。因此，总数据量较上一代高出一个甚至多个数量级。新发射卫星会与临近服役末期的老旧卫星并行运行，待老旧卫星达到设计寿命后再逐步完成退役。随着在轨卫星数量持续增长，空间碎

片风险也随之攀升，低地球轨道的相关风险尤为突出。这对空基观测系统的可靠性构成潜在威胁。为应对这一问题，遵循空间可持续发展指南与标准的重要性日益凸显，其中就包括要求老旧卫星在服役期满后完成离轨处置。

当前在轨及规划中的气象与相关环境卫星清单及其参数，可在“[WMO OSCAR/空间](#)”数据库中查询获取。

当下，卫星观测在天气、气候及整个地球系统监测领域的价值达到历史新高，而相关技术能力与航天产业整体正处于高速发展阶段。因此，卫星运行方必须调整优化全球观测架构，以满足业务用户需求、适配不断变化的外部环境。

小卫星的发展是整个卫星产业的演进方向，其技术门槛与资金投入门槛更低，让各国能更便捷地获取和使用空间服务（ITU《[小卫星手册](#)》，2023年），对应的小卫星星座的重要性也在持续提升。

由此，由基准平台（LEO、GEO等）、小卫星及其他非大型卫星组合构成的混合卫星架构，已成为为气象及相关环境应用提供核心观测数据的高效方案，新增的观测能力也进一步推动了相关应用与服务的发展。

1.2.2 大气成分观测

大气成分观测由WMO全球大气监视网（[GAW](#)）统筹协调。这是WMO的一项研究计划，核心目标是推动全球形成对大气成分及其变化的协同统一认知。该计划统筹覆盖从全球到局地尺度的高质量大气成分观测（温室气体、臭氧、气溶胶、选定活性气体、大气总沉降量、紫外辐射），为政策制定者提供可靠的科学信息，支撑相关国际公约落地，同时助力深化对气候变化与远距离跨界空气污染的认知。

这套大气成分综合观测系统是该计划的核心骨干。该系统由WMO会员及伙伴组织运行的地基观测模块和卫星观测组成部分共同组成。地基观测网络包含分布在100余个国家的约400个站点，以及由各类贡献网络运行的站点。该站点网络辅以定期船舶航次观测与机载观测作为补充，可针对对流层上部和平流层低层开展特征观测，重点覆盖臭氧、太阳辐射、气溶胶及部分痕量气体相关要素。

近年来，卫星计划产出了大量大气组分及相关参数的重要观测数据，对GAW网络的地面观测形成补充。将GAW地基站点的高精度局地观测数据，与近乎全域覆盖的卫星观测数据相结合，可得到全球尺度下更完整的大气成分分布及相关过程图景，还能为仪器校准提供交叉校验支撑。大气成分卫星观测由地球观测卫星委员会（[CEOS](#)）通过大气成分虚拟星座（[AC-VC](#)）统筹协调，聚焦空气污染、温室气体、平流层臭氧三大核心领域的相关观测需求。

1.2.3 水文观测

WMO水文观测系统（[WHOS](#)）是面向所有水文数据提供方与使用方，在国家、区域、国际层面实现可靠水文数据交换与获取的统一框架。它搭建了数据与信息交换基础设施，支撑各类预警系统（EWS）运行，实现数据获取、技术能力建设与数据共享政策推广。

WHOS依托水文与气象站点网络完成基本水文要素的测量。这类站点会收集地表水与地下水的流量、水质相关水文观测数据，其中自动站可实现近实时数据传输。自动站可利用移动电话网络、VHF/UHF无线电链路，或是通过气象卫星或通信卫星完成数据传输。传输既可定时定点上报，也可在特定事件触发后（例如水位超出设定阈值）通过专用应急通道完成数据推送。

过去二十年间，卫星测高数据在水文领域的应用持续增长，被用于构建水位时间序列、估算径流量等。卫星测高的测量精度也得到显著提升，让这类数据能更好地服务于业务运行、气候分析与科研工作。2022年12月地表水体与海洋地形（SWOT）卫星专项发射，标志该技术发展达到新高度，该卫星专项可实现全球内陆水体全覆盖观测。

近实时卫星反演降雨估算数据是水资源管理的核心输入，对洪水预警系统尤为关键，这类数据可与局地地基观测数据融合，进一步提升数据质量。

合成孔径雷达（SAR）不受天气、昼夜、积云影响，具备全天候数据采集的能力，这一突出优势让该技术在灾害监测、环境监测等多个领域得到广泛应用，其中SAR数据尤其适配洪水制图场景，可为灾害风险防控提供有力支撑。

在水质方面，目前正开展利用水体光谱特征（主要集中在可见光与近红外波段）反演水质要素的相关测试，相关成果展现出良好的落地前景，有望进一步推广至业务化应用场景。

1.2.4 冰冻圈观测

WMO全球冰冻圈监视网（GCW）是一项跨领域专项工作，旨在协助各会员持续提升冰冻圈各要素变化的观测、上报能力，并预测冰冻圈演变及其对天气、气候、水资源、生态环境与人类社会产生的影响。

GCW的地表观测网络名为“CryoNet”，由核心站点、贡献站点及附属网络共同组成。截至2023年，已有超700个GCW站点在WMO“OSCAR/地表”数据库完成注册，可对积雪、冰川、海冰、多年冻土等一类或多类冰冻圈要素开展观测。

不同冰冻圈要素的观测技术差异显著，传统方法与新兴技术并行应用。例如，基于GNSS或宇宙射线中子/μ子传感器的新型观测系统，正被测试用于积雪深度、积雪水当量（SWE）的日常观测或同时观测两项指标。使用探地雷达（GPR）确定积雪深度已成为积雪与冰川区域的常规操作。冰川厚度勘测越来越多地采用无线电回波测深（RES）技术，设备可依托车载拖拽、便携手持或机载平台部署。星载雷达测深仪也已纳入规划。雷达系统还可用于解析冰川与积雪内部层理结构、冰-床界面特性，识别冰下、冰内水体及积雪液态水含量。

海冰观测依靠人工手段与遥感技术协同开展。多种自动化传感器可直接观测或反演海冰厚度。包括探地雷达、电磁测深（常搭配激光辅助上表面探测）、海冰物质平衡站、机械式冰厚仪、向上声呐等。无源微波传感器与有源（SAR等）微波卫星传感器不受天气、光照条件限制，是估算海冰范围、密集度与发展阶段效率最高的手段。无云区域获取的光学观测数据可对微波有源、无源观测形成补充。电阻率层析成像（ERT）技术常用于识别富多年冻土区的冰层与冻土体。此外，岩石冰川运动速度可通过地面大地测量（TGS）或合成孔径雷达干涉测量（InSAR）技术获取。

依托上述全部观测数据，能够在气候变化背景下开展全球冰冻圈状态评估，解答极地与山地淡水资源相关科学问题。

1.2.5 空间天气观测

空间天气指发生在太阳、磁层、电离层、热层等空间区域内，可能影响近地环境的各类状态与过程。针对空间天气现象需要监测的物理要素分为两类：一类与扰动的太阳源头相关，例如太阳活动区、日冕物质抛射；另一类用于量化受扰动的地球环境，包括电离层与磁层状态、地面磁场、宇宙辐射。

针对这两类要素，地基与空基观测系统会同步开展原位与遥感测量。其中也包含星载原位测量。

为支撑空间天气业务，现已开展多类地基观测：太阳光学观测、太阳射电流量与射电频谱观测、中子监测器开展的宇宙射线观测、地面磁场观测，以及通过电离层相对浑浊仪、电离层测高仪、GNSS接收机开展的电离层观测。

用于监测空间天气的星载仪器，部分搭载在同时用于监测地球天气的卫星上。多颗地球静止轨道卫星可生成极紫外（EUV）波段的太阳图像，同时测量极紫外、X射线通量，以及电子和质子通量。

除此之外，多颗LEO卫星也会开展相关测量，涵盖太阳成像与通量观测、极光成像，以及用于量化电离层和热层特性的无线电掩星观测。

最后，更远空间的航天器也会开展空基观测。最具代表性的是位于地球向阳侧太阳风上游、L1拉格朗日点附近的航天器，可测量包含磁场在内的太阳风等离子体特性、粒子通量，还能获取日冕仪图像（即通过人工遮挡太阳盘面得到的太阳外围图像）。部分更远的航天器环绕太阳运行，可观测从地球无法看到的太阳表面区域，从侧视角追踪太阳抛射物向地球传播的过程，同时开展原位太阳风观测。

1.2.6 气候观测

气候观测由全球气候观测系统（[GCOS](#)）协调。GCOS由WMO、联合国教科文组织政府间海洋学委员会（IOC-UNESCO）、联合国环境规划署（UNEP）和国际科学理事会（ISC）共同发起。

GCOS是规划、开发和审查全球气候观测系统的关键国际协调机制之一。它在确定气候应用的观测需求方面也发挥着至关重要的作用。GCOS确定的一组变量，即基本气候变量（ECV），有助于表征地球气候，提供全球尺度气候变化的全貌。

卫星观测和地基观测都是全球气候观测的主要贡献者。GCOS统筹促进由WMO支持的地基网络、全球海洋观测系统（[GOOS](#)）、由CEOS和CGMS协调的空基观测，以及伙伴组织运行的众多陆地网络所开展的气候观测。

长期、准确且稳定的观测对于理解气候变化至关重要，GCOS在确保统筹协调全球气候观测、及时提供信息以及建立最佳做法和方法以保障高质量数据和校准方面发挥着关键作用。

1.2.7 海洋观测

海洋观测由GOOS统筹协调。[GOOS](#)由WMO、IOC-UNESCO、UNEP和ISC共同发起。GOOS的主要目标之一是促进多种不同观测平台的无缝整合。这些平台涵盖范围广泛，包括但不限于卫星、浮标、船舶观测和自主航行器。通过利用这些平台的技术，GOOS致力于全面捕捉世界海洋中发生的复杂过程和现象。

卫星配备先进的遥感仪器，包括有源和无源微波系统，在监测大尺度海洋特征方面发挥着关键作用。卫星依托太空观测视角，能够观测大范围海洋格局，如海面温度、海洋水色和海平面变化。这些观测对我们理解全球气候系统和长期趋势具有重要贡献。

漂流浮标战略性地部署于各海洋区域，如同哨站实时收集海洋状况的数据。这些漂浮平台配备传感器，可测量海面温度、盐度和海流等参数。从浮标获取的数据有助于开发精确的模式和预报，辅助预测风暴、海啸和气候变化等事件。

水下滑翔机和廓线浮标等自主航行器可深入海洋深处，提供关于次表层特性的宝贵信息。这些自主观测设备穿梭于海洋深处，收集温度、盐度和营养盐含量等数据。它们能够在广阔海域航行的能力使科学家能够获得三维视角，增进我们对海洋层化和环流格局的理解。

此外，还有其他若干观测协调小组网络利用各种技术提供长期、全球、高质量的海洋现场观测。这些网络追踪全球海洋状况的变化以及海洋温度、海流、海浪、海平面、盐度、碳和氧等变量，这些变量对于表征全球海洋环境的变化至关重要。

参考文献

- [1] WMO-No. 1160 – Manual on the WMO Integrated Global Observing System, <https://library.wmo.int/records/item/55063-manual-on-the-wmo-integrated-global-observing-system-wmo-no-1160?offset=42>
- [2] The WMO Integrated Global Observing System (WIGOS) website, <https://community.wmo.int/en/activity-areas/WIGOS>
- [3] The Coordination Group for Meteorological Satellites (CGMS) website, <https://cgms-info.org/>
- [4] WMO OSCAR/Space database: <https://space.oscar.wmo.int/spacecapabilities>
- [5] ITU Handbook on Small Satellites, Edition of 2023, <https://www.itu.int/pub/R-HDB-65-2023>
- [6] The Global Atmosphere Watch Programme (GAW) website, <https://community.wmo.int/en/activity-areas/gaw>
- [7] The WMO Hydrological Observing System (WHOS) website, <https://community.wmo.int/en/activity-areas/wmo-hydrological-observing-system-whos>
- [8] The Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) website, <https://ceos.org/>
- [9] The CEOS Atmospheric Composition Virtual Constellation website, <https://ceos.org/ourwork/virtual-constellations/acc/>
- [10] The Global Cryosphere Watch (GCW) website, <https://community.wmo.int/en/activity-areas/global-cryosphere-watch-gcw>
- [11] The Global Climate Observing System (GCOS) website, <https://gcos.wmo.int/>
- [12] The Global Ocean Observing System (GOOS) website, <https://goosocean.org/>

第2章

气象卫星业务（MetSat）

2.1 气象卫星业务（MetSat）的定义及其频率划分

《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

ITU《无线电规则》中划分给MetSat和EESS
供气象卫星传输数据使用的频段

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1） （以及空对空方向）
460-470 MHz（EESS和MetSat次 ¹ ）	7 190-7 250 MHz（EESS主 ^{2,3} ）（注1）
1 670-1 710 MHz（MetSat主）	8 175-8 215 MHz（MetSat主）
2 200-2 290 MHz（EESS主）（注1） （以及空对空方向）	28.5-30.0 GHz（EESS次）（注1）

¹ 依据《无线电规则》第5.290号脚注，部分国家将气象卫星业务划分为主要业务。

² 依据《无线电规则》第5.460A号脚注，EESS仅限用于跟踪、遥测与遥控，不得要求固定业务、移动业务对其提供干扰保护。

³ 依据《无线电规则》第5.460B号脚注，7 190-7 235 MHz频段内的地球探测卫星业务，不得要求现有及未来的空间研究业务电台对其提供干扰保护。

表2-1（完）

可用于MetSat资料传输的分配	
空对地方向	地对空方向
7 450-7 550 MHz （MetSat主，仅限于静止卫星）	40.0-40.5 GHz （EESS主）（注1）
7 750-7 900 MHz （MetSat主，仅限于非静止卫星）	
8 025-8 400 MHz （EESS主）（注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）	
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1） （以及25.25-27.5 GHz的空对空方向）	
37.5-40.0 GHz （EESS次）（注1）	
65.0-66.0 GHz （EESS主）（注1）	

注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25.5-27.0 GHz）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、近红外及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气象卫星上进行“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”。

为了补充静止轨道卫星对极地地区观测的覆盖盲区，推出了新一代大椭圆轨道卫星，即北极-M系列。该系列由两颗卫星组成、交替运行，可实现近似静止卫星的北极全域观测覆盖。卫星原始观测数据（通过多组可见光、红外频段拍摄的地球图像）将回传至运行机构主地面站，完成后续处理后再分发给各类用户。

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）。

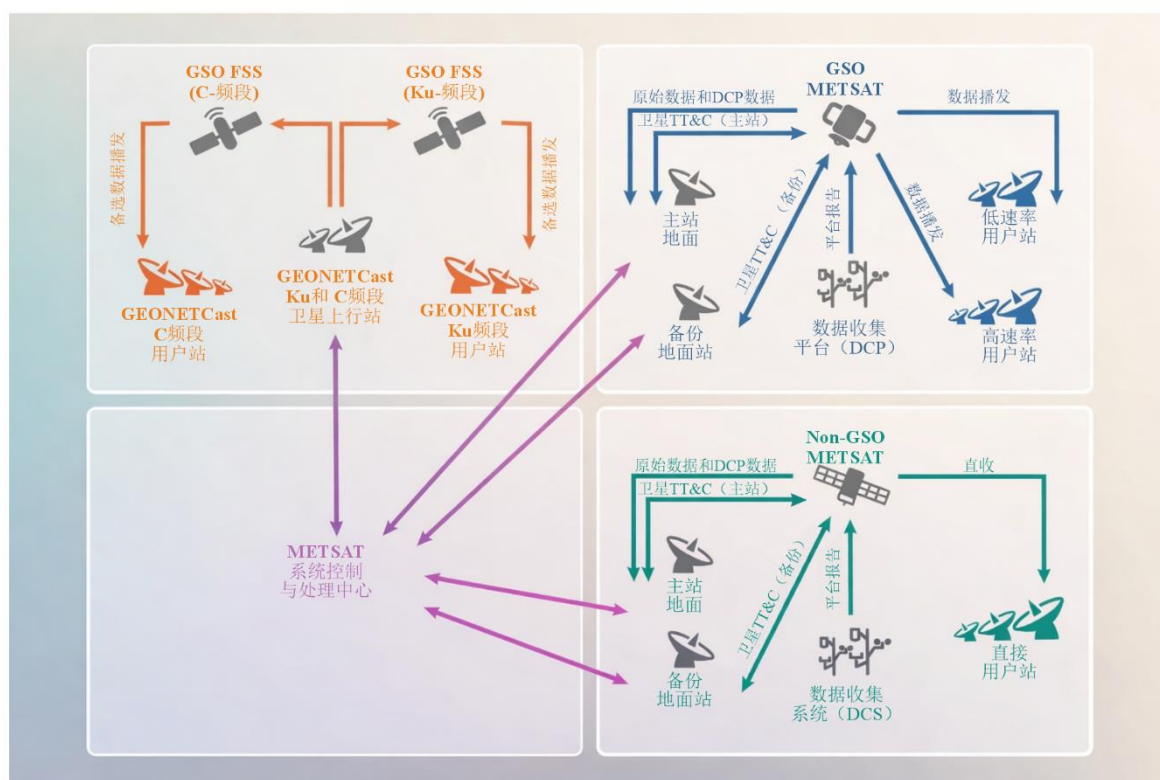
数据收集平台（DCP）通常位于地面、飞机、船舶和漂流浮标上，向对地静止气象卫星传输资料。此类DCP收集到的资料是关于地表温度、风速、降雨强度、河流水位、大气气体等基本气象要素，同时还可多项其他业务提供数据支撑，例如海洋污染物监测、森林火情监测、地震预警、海啸预警、雪崩预警、水位监测与洪水告警、航道管理、水资源调蓄分配以及气候科研工作。它们也可传输其现有位置，以便判定其运动路线。除区域性DCP信道的操作外，MetSat的运营部门也通过国际频道的操作对国际数据收集系统（IDCS）做出贡献。作为一项额外的应用，一些专门的IDCS信道也可划归应急/灾害监测系统使用。

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2-1

MetSat系统的一般架构



2.2 采用对地静止（GSO）卫星的MetSat系统

在WMO全球综合观测系统（WIGOS）的框架内，任一时刻均有多颗气象卫星在轨运行以确保从对地静止轨道全面覆盖对地观测（见图1-3）。通过计划中未来发射的气象卫星取代或进一步补充现有卫星系统的方法来确保从对地静止轨道开展持续和长期的全球覆盖观测。

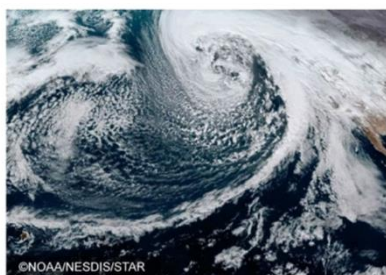
2.2.1 GSO MetSat原始图像传感器数据传输

GSO气象卫星上的可见光、近红外和红外成像仪及其他传感器获取的原始数据，传输至主运行地球站。此下行链路所使用的频段取决于接收该地球静止轨道气象卫星上仪器所产生数据量所需的带宽，范围从使用分配给气象卫星业务的1 670-1 698 MHz、7 450-7 550 MHz、8 025-8 400 MHz频段，直至25.5-27 GHz频段。这些数据随后在地面进行处理，其内容在1 670-1 690 MHz频段再广播，和/或通过其他电信手段分发，例如GEONETCast。

图2-2提供了GSO气象卫星上成像仪仪器的示例图像。

图2-2

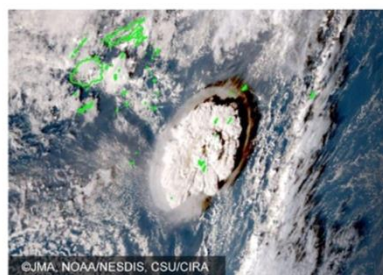
GSO气象卫星上成像仪仪器的示例图像



过境加利福尼亚的风暴系统
GOES-18/ABI, 2023/01/04



中心位于欧洲的风暴艾格尼丝
MTG-11/FCI, 2023/09/27



汤加洪阿哈阿帕伊岛火山喷发
Himawari-8/AHI, 2022/01/15

Meteo-02-02

对于目前正在开发并将于2024-2036年期间部署的最新/下一代GSO MetSat系统，这些GSO MetSat系统仪器数据下行链路的数据速率和相关带宽需求将显著增加（高达1.2 Gbit/s）。这推动了更高频率的使用，例如7 450-7 550 MHz频段（Electro-L和FY-4系列的原始数据传输）、8 025-8 400 MHz频段（GOES-R和GeoXO）、18.0-18.3 GHz（2区）、18.1-18.4 GHz（区域1和区域3）（Himawari和FY-4系列），特别是25.5-27 GHz频段（Meteosat第三代（MTG）系列和FY-4卫星的主数据采集（MDA））将不得不被使用。

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6至18米的天线（根据所用频段调整）并通常以3度的最小仰角进行操作。

2.2.2 GSO MetSat数据播发

以下2.2.2.1至2.2.2.5段描述了WIGOS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)

截至2025年9月,美国的地球静止轨道业务环境卫星(GOES)包括最新的GOES-R系列航天器(GOES-16、17、18和19),而legacy GOES NOP航天器(GOES-13、14和15)已由NOAA退役。GOES-R系列的GOES再广播(GRB)业务在1 686.6 MHz运行,取代了legacy GOES可变(GVAR)业务,需要更大的带宽以容纳约30 Mbit/s的大幅增加的数据速率,而GVAR约为2 Mbit/s。GVAR在1 685.7 MHz运行,需要4.22 MHz带宽,而GRB需要9.7或10.9 MHz来传输处理后的数据,在1 686.6 MHz运行。GRB传输完整的1b级产品集,包括来自所有GOES-R系列仪器的数据,从GOES-R位于75°W和137°W的赤道位置半球式广播(下至5度仰角)。与GVAR一样,这些广播覆盖GOES-R航天器组合覆盖范围内的众多接收站。这些接收站不仅包括北美和南美的站点,还包括新西兰、法国、西班牙和英国的地点。这些接收者中的大多数是从事气象研究或预报的大学和政府机构。其他包括向商业利益提供天气预报的增值服务商。

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天气传真(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(卫星同时退役)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。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。

目前仍在气象部门、高校、环境机构、新闻机构、院校及其他单位投入使用的WEFAX接收站数量已十分稀少。

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0.6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3-6 dB/K。LRIT已在多个MetSat系统上运行，即GOES卫星、Meteosat第二代卫星、GEO-KOMPSAT-2A、Himawari卫星、Electro-L卫星以及FY-4系列卫星，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、GEO-KOMPSAT-2A卫星、Electro-L卫星以及FY-4系列卫星。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至7米，最小仰角大约为3度（GOES为5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数据采集系统（DCS）

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，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。

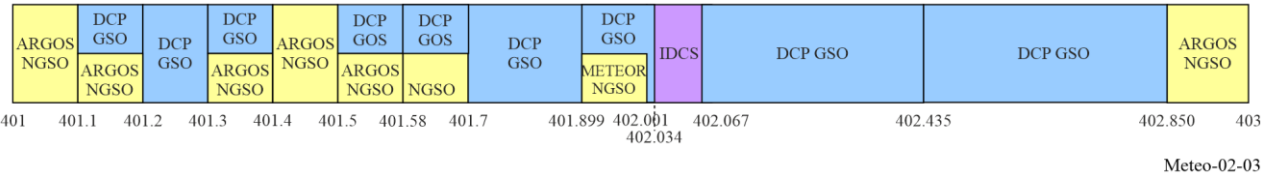
DCP向静止MetSat报告使用401.1-402.85 MHz范围内的频率，而402.0355-402.0655 MHz则用于国际用途（11个（I12至I22）3 kHz带宽的信道）。通过采用窄带（小至0.75 kHz）和将报告时间缩短至10秒，有可能从大量的这类平台获取数据。如对于GOES-R系列卫星，2024年大约有30 000个GOES高速率DCP在运行，每天发送的讯息量高达1 000 000个，每天向WIGOS发送超过600万观测资料。用户对DCS的支持保持稳定，甚至有所增加。未来GSO MetSats计划搭载DCS，例如将于2030年代发射的GeoXO星座——这将确保DCS的支持延续至2050年代以后。

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）401-403 MHz波段的基本通用分区，同时遵守建议书ITU-R SA.2045中介绍的共享条。

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



2.3 采用非GSO卫星的气象卫星系统

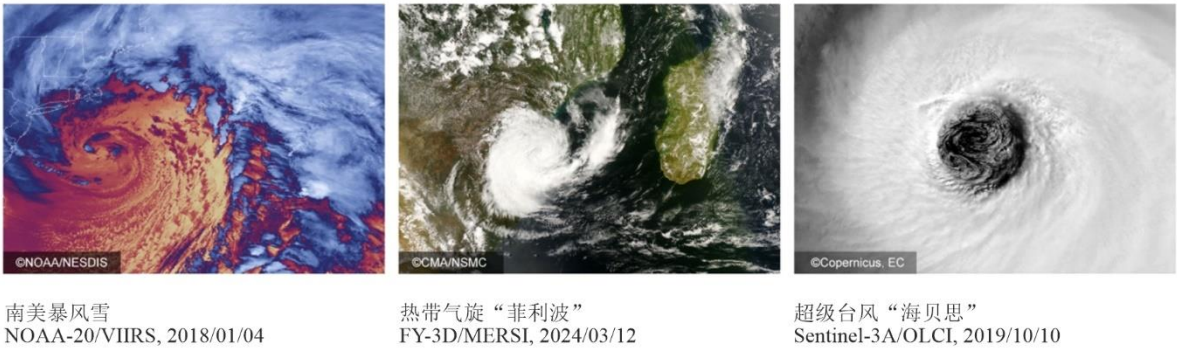
除大量的GSO MetSat以外，非GSO气象卫星系统（大多为太阳同步极地轨道，但也包括高椭圆轨道卫星系统）通过来自多种被动和主动传感器的全球覆盖测量数据，对WIGOS的卫星贡献形成补充，这些传感器在可见光、红外和微波光谱区域进行观测。

世界多个国家和地区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）。

图2-4为正在使用的非GSO MetSat系统中采用的成像仪器获取云、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章提供了非GSO MetSat系统中微波频谱的有源和无源传感器观测样例。

图2-4

非GSO MetSat系统中采用的成像仪器获取的云图样例



Meteo-02-04

2.3.1 非GSO气象卫星原始设备数据传输

现役非静止轨道气象卫星主要为极轨卫星，也有少量倾角为35、50、66度的非太阳同步圆轨道卫星以及大椭圆轨道卫星，其采集的原始观测数据将根据所需带宽，选用7 750-7 900 MHz或8 025-8 400 MHz频段，传输至大多部署在高纬度地区的专用主接收站。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。在“北极-M”系列大椭圆轨道卫星的场景下，其数据传输机制与地球静止轨道卫星类似，当主地面站处于该卫星的可见时段内时，卫星每30分钟/15分钟执行一次数据传输。

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）及未来的FY-5未来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7 750-7 900 MHz或8 025-8 400 MHz频段（例如，目前的JPSS、Suomi-NPP、Metop、FY-3、METEOR-M和Arctica-M）。

2.3.2 非GSO气象卫星数据播发

2.3.2.1和2.3.2.2段描述了在WIGOS框架内操作的非GSO气象卫星系统的直接播发功能，被称为“直接读取”。这种直接读取模式可优化数据传输时延，当气象卫星处于任意位置的用户站的可见范围内时，气象卫星会将仪器采集的部分子集数据直接传输至该用户站。

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。LRPT基于数字传输方式并在137.1 MHz和137.9 MHz上运行，其单个带宽也可达到150 kHz。

2.3.2.1.3 高分辨率图像传输（HRPT）

在气象卫星协调组（CGMS）的框架下，CGMS于2014年发布了修订版的《全球直接广播规范（低轨直接读取（HRPT/AHRPT））》。这份直接广播规范适用于采用1 698-1 710 MHz频段开展数据分发的非地球静止轨道气象卫星系统。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。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系统的两倍以上。

在最新的一些业务气象卫星（即METEOR-M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。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度，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。

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，以空对地方式分配给MetSat必须使用的下一个更高可用频带是7 750-7 900 MHz。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60 Mbit/s，中心位于7 780或7 820 MHz，或是资料传输速率在77 MHz带宽内为80 Mbit/s，中心位于7 790或7 860 MHz。此外，FY-3系列中的延迟图像传输（DPT）服务可用于在8 212.5 MHz内进行转储数据传输，其带宽为375 MHz，资料速率为455 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）

非GSO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DCS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度倾斜轨道）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。

“北极-M”系列大椭圆轨道气象卫星上也搭载了数据收集系统，用于从远程DCP采集气象及其他环境数据。各数据收集平台向“北极-M”系列卫星传输数据的工作频段为401-403 MHz。

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）。该系统是全球对地观测综合系统（GEOSS）的重点项目，由政府间地球观测组织（GEO）统筹推进，依托现有C波段（3 800-4 200 MHz）、Ku波段（10 700-11 700 MHz）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。

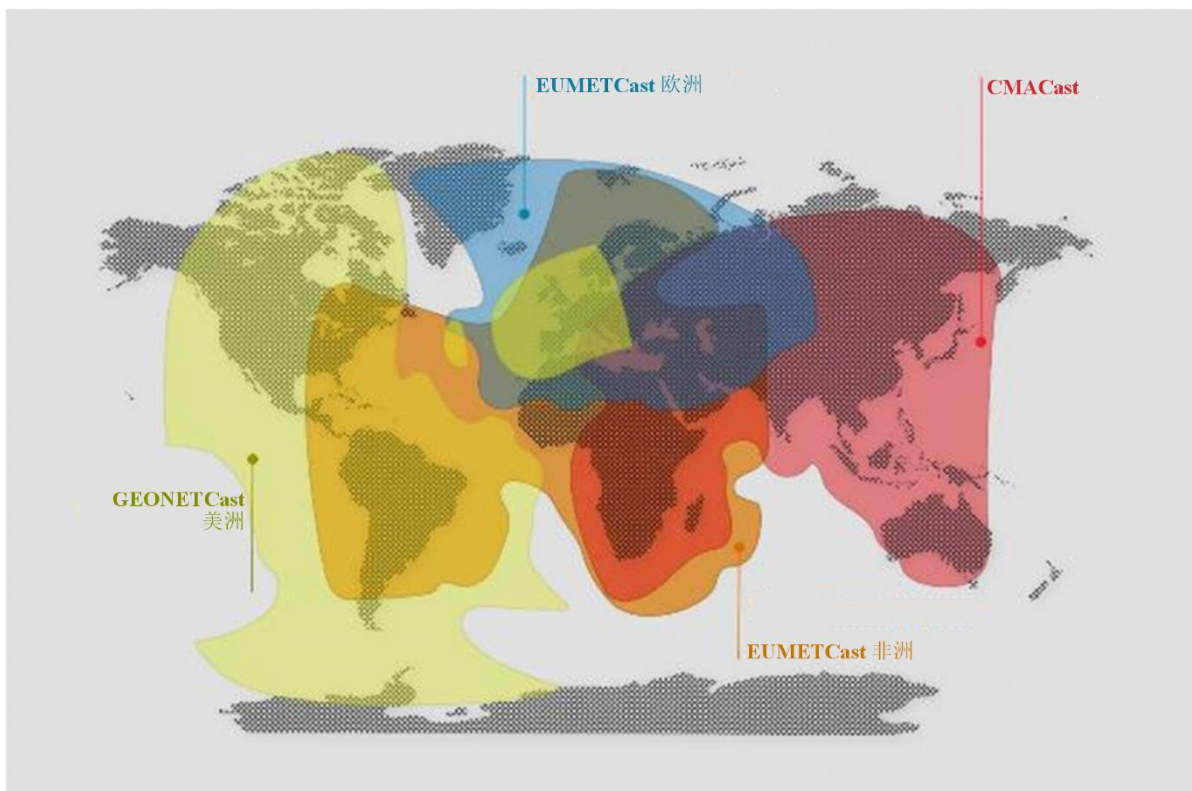
GEONETCast的设计思路是利用全球通信卫星网络的组播能力，向各国气象机构及各类用户群体全球分发气象、水文、气候相关信息，其中包含各类灾害预警信息。在此体系中，C波段卫星的作用尤为关键：在热带、赤道等降雨充沛的区域，雨衰会导致其他通信频段难以稳定工作，C波段可有效规避该问题。为搭建并稳定运行该系统，多个区域中心依托数字视频广播（DVB）技术，负责建设、运维卫星区域数据分发系统，面向统一用户群体提供配套互补服务。

当前合作方包含中国气象局（CMA）、欧洲气象卫星开发组织（EUMETSAT）、美国国家海洋和大气管理局（NOAA）以及众多第三方数据服务商。

该系统依靠多套子系统融合实现全球覆盖：面向亚太及非洲部分区域的风云广播系统（CMACast）、覆盖美洲区域的美洲全球对地观测广播子系统、覆盖欧洲、非洲及美洲部分区域的欧洲气象卫星广播系统（EUMETCast）。

图2-5

GEONETCast全球覆盖



Meteo-02-05

第3章

气象辅助业务

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章和第7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，它也可由从飞机展开后穿越大气层。移动基站可位于一个固定地点，或放置在移动平台上（例如，搭载在船舶或研究飞机上）。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或移动平台定期施放，至少在0000和1200 UTC时各施放一次，从而组成了WIGOS全球高空网（WMO-No. 1160）。

高空观测相关说明详见《仪器和观测方法指南》（WMO-No. 8）第一卷《气象变量测量》第12章、第13章。

3.1.1 划分的无线电频段

表3-1⁴列出ITU《无线电规则》（RR）中划分给气象辅助业务的各频段（不含各国脚注另行规定的频段），供各类气象辅助系统与气象辅助应用使用。

表3-1

ITU《无线电规则》中划分给气象辅助业务的频段

频段
8.3-9 kHz
9-11.3 kHz
27.5-28 MHz*
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*

* 在ITU-R及WMO相关文件中，未查询到该频段现有及规划使用情况的相关信息。

⁴ 这些频段的现行频率划分，参见《无线电规则》第5条。

对在气象辅助划分频段运行的系统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。

各参与国际数据交换的观测站所使用无线电探空系统的业务运行详情，当前或后续将可在“OSCAR地表”（网址：<https://oscar.wmo.int/surface/>）查询，这是WMO的WIGOS元数据资料库。“OSCAR地表”为在线数据库，收录各类测量仪器的详细参数。运行观测站点的WMO会员负责录入并持续维护上述相关信息。

气象辅助业务的用户还有：

- 环保部门
- 救灾组织
- 大学和气象研究团队
- 国防部门
- 航天发射运行单位。

诸多非WMO的气象辅助系统通常独立于各国气象部门常规业务运行，且可能未在“OSCAR地表”完成注册。此类系统搭载于移动平台，业务运行期间可布设于各类区域。为避免其对各国气象部门布设的无线电探空设备产生干扰，需要对此类额外系统的使用实施管控。相关管控规范由各国无线电管理机构与国家气象部门联合制定并落地执行。

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

大气温度、压力、相对湿度以及风速风向垂直廓线的精准观测对气象业务至关重要。该类观测数据是数值天气预报模式的核心输入资料，支撑从甚短期（临近预报）天气预报直至长期（气候）预测等各类预报工作。还应用于气候监测业务。短期预报要求温度与相对湿度观测的垂直分辨率达到100米或更高标准。

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，尤其对于无源探测仪。观测要素还可涵盖臭氧、气溶胶、放射性物质等大气组分。

气象辅助业务系统将离地高空获取的气象变量原位观测数据传输至由接收机与数据处理系统构成的基站。数据经由基站传输至气象通信网络，与其他接收站的数据汇总融合。气象辅助设备使用后通常无法回收，因此需在不降低观测质量的前提下，最大限度控制发射机与探测组件的成本。

现役气象辅助系统包括：

类型	说明
无线电探空仪	由气球携带升空穿越大气的探测仪器，搭载可测量一种或多种气象要素（压力、温度、湿度等）的传感装置，并配备无线电发射机，将观测数据传回地面观测站。
臭氧探空仪	体积小巧、轻便紧凑的气球载探测设备，用于探测约30至35公里高度范围内大气臭氧的垂直分布。
下投式探空仪	由高空飞机投放、依靠降落伞下落，通常可持续向机载接收站回传15分钟至半小时观测数据。
系留探空仪	搭载于系留气球上，一般在大气边界层内持续回传观测数据。
小型无人驾驶航空器（远程操控飞行器（RPV）/无人航空系统（UAS））	搭载与无线电探空仪同类的传感组件，可前往远洋等偏远区域开展探测，并以标准气象报文格式回传观测信息。

全球基本观测网（GBON）为近年新推出的观测体系（详见WMO-No. 1165出版物第11章）；加之环境、国防领域无线电探空仪应用持续增多，各国气象部门对海洋原位观测数据的需求不断上涨，未来数十年内各类新型气象辅助系统的使用规模预计将大幅提升，以满足持续扩张的观测需求。

3.2 气象辅助传感系统的示例

3.2.1 无线电探空仪

温度、风与相对湿度的高空测量资料，是开展业务天气预报的数值天气预报（NWP）模式分析初值场所用三类基本测量数据。陆地上绝大多数温度、相对湿度原位观测由无线电探空仪获取，而从偏远岛屿或船舶施放的无线电探空仪虽对海洋上空的覆盖范围有限，却能提供至关重要的测量数据。

WIGOS网每日施放超过1 500部无线电探空仪（图3-1）；其中约300部无线电探空仪用于全球气候观测系统高空网（GUAN）指定站点的测量。每部业务无线电探空仪传回的观测资料会立即供各国气象部门使用，支持开展本地预报工作。全球各地的数值天气预报均需要该类资料，目标是完整观测报文（采用标准化气象电码编制）在三小时内分发至全球所有气象部门。观测报文同时会归档存储，广泛应用于各类科学研究。

图3-1

WIGOS数据质量监测系统统计的高空陆地观测可用情况



Meteo-03-01

业务无线电探空仪通常由气象气球携带升空（图3-2），最高可升至35千米高度，气球在此高度发生爆裂。开展常规观测的高度随业务用途与地理位置存在差异；对多数国家而言，气球及升空气体的成本会限制探测高度。受上述因素影响，全球大量观测的探测高度不超过约25千米。全球尺度预报需考量高层气团运动，但无需像近地面层状态一样的详细信息。而气候监测及相关科学研究，则需要高层大气可抵达范围内获取高分辨率观测数据。

图3-2

无线电探空仪飞行装置



Meteo-03-02

用于施放无线电探空仪的基站站点通常配备专用设施，以便能在各种天气条件下施放气球。最关键站点配备应急电源和住宿设施，即便当地基础设施受极端天气或其他情况（如工业事故）影响，测量工作仍可继续。

承载无线电探空仪的气球设计旨在以约300米/分的速率上升时发挥最佳性能。它们随高空大气风移动，上升期间有时可能偏离施放点超过250公里。下降期间，它们可能再漂移150公里。下降数据同样被视为具有潜在价值。无线电探空仪的测量数据会持续传输至位于气球施放点的基站，时长可达三小时。上升初期若出现显著接收中断（即使仅持续10秒）亦属不利，因为这会削弱无线电探空仪解析近地表温度与相对湿度变化的能力 – 而这些数据正是本地预报所需。若数据缺失达四到五分钟（即便仅因测风导航信号接收故障所致），或在达到施放人员设定的目标高度前终止，通常需补放第二个无线电探空仪以满足业务要求。

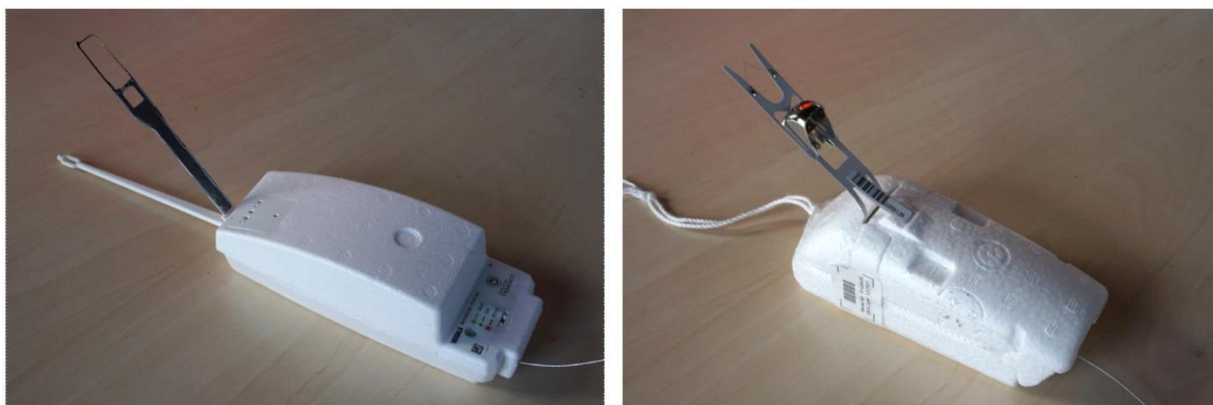
受可用电池限制，发射功率始终较低。无线电探空仪通常采用锂或碱性电池，这些电池须在飞行中遭遇的极低温环境下正常工作，且在气球爆裂后坠地时不得危害环境或公共安全。

典型的无线电探空仪（见图3-3）包含几个主要部件：发射机、电池、传感器组，以及通常配备的NAVAID/GNSS（如GPS）接收机。发射机将数据传送至接收站。传感器组包含用于测量温度、风、相对湿度和气压等一个或多个大气参数的传感器。特殊情况下，传感器组可搭载臭氧测量传感器（臭氧探空仪）。传感器组还会对传感器读数进行适当编码，以便传输至地面站。

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。被动跟踪系统采用装载的NAVAID/GNSS接收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

无线电探空仪示例



照片摘自《仪器和观测方法报告》No. 143

Meteo-03-03

3.2.2 下投式探空仪

下投式探空仪的组件与无线电探空仪类似，但设计为从飞机上投放，在降落伞下降过程中对大气进行廓线探测（图3-4）。所有下投式探空仪均在401–406 MHz频段工作，并利用NAVAID/GNSS进行测风。在业务应用中，针对有限的特定区域，下投式探空仪在空间和时间上的布设密度远高于无线电探空仪。它们主要用于海上热带风暴的追踪与廓线探测。可在一次飞行中投放多个下投式探空仪并同时跟踪。高密度布设要求使用高稳定度窄带发射机，类似于无线电探空仪网络中密度较高部分所采用的设备。下投式探空仪亦用于对偏远海域的天气现象或基本大气状态进行廓线探测，偶尔也用于陆地之上。

图3-4

下投式探空仪



Meteo-03-04

3.3 影响气象辅助设备系统特性的因素

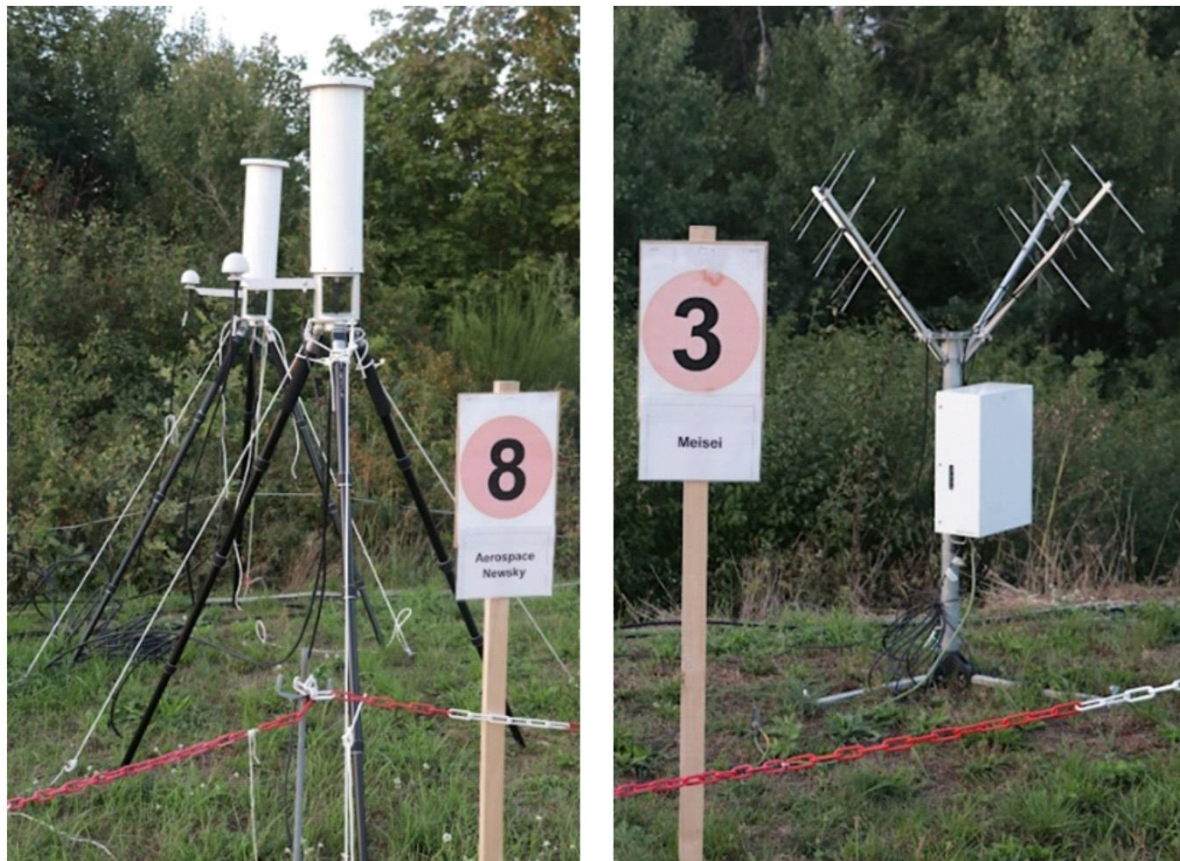
气象辅助设备系统由若干基本无线电通信组件构成。系统的地面部分通常包含天线/接收机系统及信号处理系统。ITU-R RS.1165建议书 – 《403 MHz及1 680 MHz频段气象辅助业务中无线电探空仪系统的技术特性与性能标准》中载述了各类用于气象辅助业务的系统及其技术参数。

3.3.1 地基接收机天线系统

无线电探空仪和下投式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。对于无线电探空仪，天线/接收机系统通常位于地面，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3-5）。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3-5

全向天线和定向系统（401-406 MHz）



照片摘自《仪器和观测方法报告》No. 143

Meteo-03-05

风测量一般通过1 668.4-1 700 MHz频段内的GNSS、RDF或雷达跟踪完成。一些国家仍然首选使用RDF追踪无线电探空仪，因其可在不受导航辅助设备/全球导航卫星系统可用性限制的情况下使用探空仪 – 此类系统在紧急情况下可能无法使用。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3-6）。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3-6

跟踪天线系统（1 668.4-1 700 MHz）



Meteo-03-06

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，以计算气象变量。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。一次性传感包对环境的影响亦是一项重要考量，且随着NMHS力求提升其业务的环境可持续性并最大限度减少无法回收的废弃物，这一因素正日益成为设备选型中的一项制约条件。

数字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，并降低无线电探空仪的质量与尺寸。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急生命安全的状况。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回地球表面。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。传感包运行所必需的电池正日趋小型化，有助于减轻整体载荷，但在环境影响方面仍构成挑战。

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。大型电池会增大传感组件的环境足迹，其增加了重量，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。现代数字发射机相较于旧式模拟发射机具有更高的频谱效率。

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和臭氧探测仪测量的例子。

3.4.1 无线电探空仪的特性

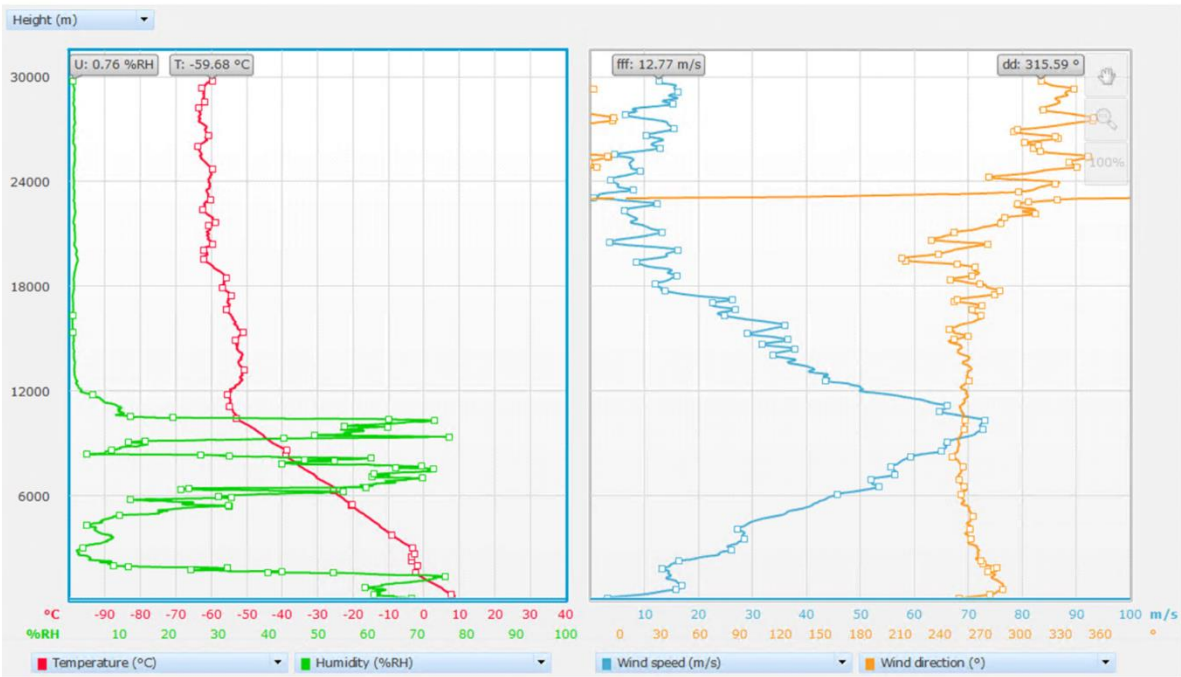
图3-7展示了2024年4月13日从沃特诺尔施放的一次无线电探空仪飞行示例，其最大高度约为30公里。在此廓线中，高度与风数据源自GPS，气压亦由GPS高度结合温度与相对湿度测量值推导得出。国际上普遍采用GPS推导气压。

图3-7左图中，最低温度出现在约27公里处。当无线电探空仪接近约11公里处的对流层顶时，相对湿度测量值趋于0%。

图3-7右图中显示了风速与风向。风速测量中可见一急流，在约11公里高度处最大速度超过70米/秒。预计各高度层风速测量精度均在±0.15米/秒以内。

图3-7

无线电探空仪测量的温度、湿度及风



Meteo-03-07

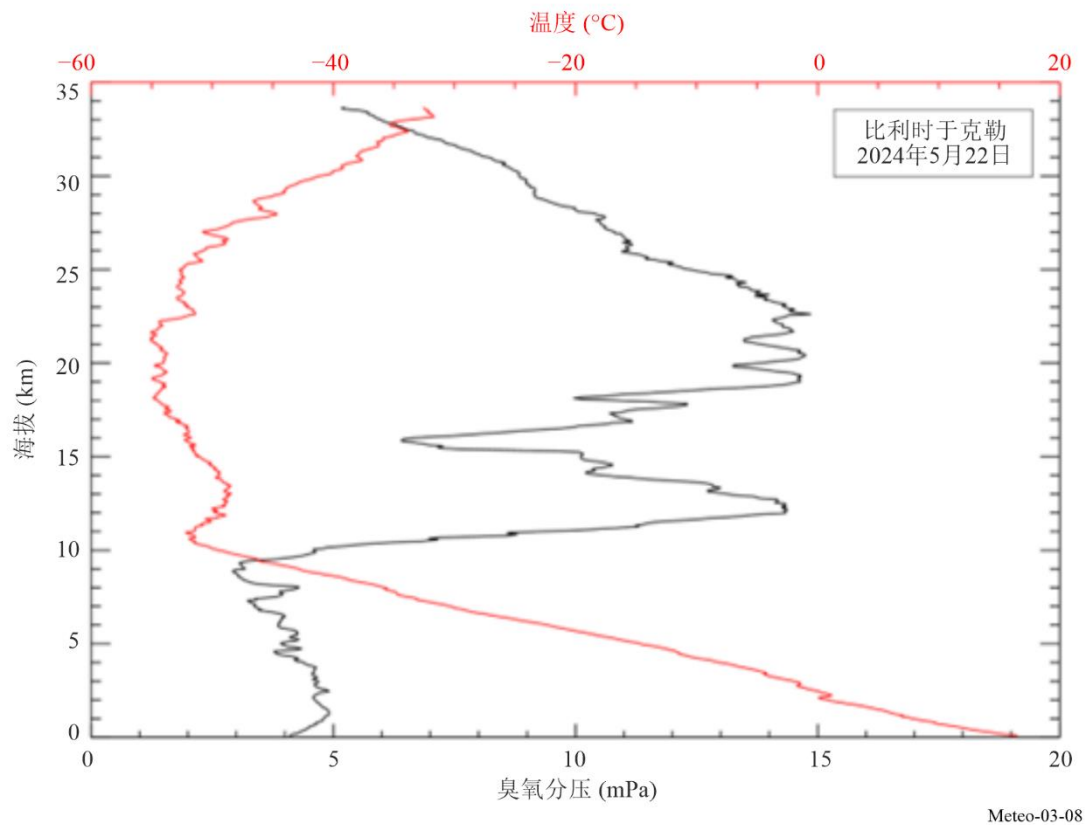
高空风测量对航空运输和国防服务具有重要价值。气象辅助设备的观测结果通常在基站转换为专用国防代码，并传送至相关作战单位。

3.4.2 臭氧探空仪的特性

全球约60个站点通过气象气球施放臭氧探空仪，利用环境臭氧鼓入含碘化钾溶液的双室电化学池中发生化学反应来测量臭氧浓度。臭氧探空仪与无线电探空仪耦合，将臭氧分压与气压、温度、湿度（PTU）及GPS导出的风数据同时传输至地面站。图3-8展示了比利时于克勒（50°N，4°E）施放的臭氧探空仪测得的臭氧浓度随高度变化示例（黑线），同时给出了耦合无线电探空仪的温度廓线（红线）。各臭氧探空仪站点的施放频率为每月一至两次至每周三次不等（于克勒即为每周三次），其中每周施放最为普遍。臭氧探空仪测量在世界气象组织全球大气监视网（GAW）计划下进行，旨在监测臭氧层状况（最大臭氧浓度出现在20至25公里之间，见图3-8），数据存于WMO世界臭氧和紫外线辐射数据中心（WOUDC）。此外，对流层臭氧（图3-8中11公里以下）也是一种重要的温室气体，而边界层臭氧对人类健康具有不利影响。

图3-8

通过耦合无线电探空仪的臭氧探空仪测量比利时于克勒上空大气臭氧浓度垂直分布示例（黑色）



3.5 气象辅助设备业务操作的差异

3.5.1 高空风型的差异及其对无线电探空仪业务的影响

北半球高纬度地区冬季，16公里以上高度的风通常并非绕极对称分布。因此，欧洲上空的强平流层风远比北美常见。另一方面，许多国家的高空风持续偏弱。高空风条件的这些差异导致各国无线电探空仪网络的运行条件存在显著差异。在一些国家（如热带地区），无线电探空仪始终保持较高仰角且距离较近；而在另一些国家，则必须跟踪至低于地平线以上5度的仰角，且距离超过200公里。

在气球仰角保持较高（尤其是高于15度）的地区，部分国家仍可使用成本较低的无线电探空仪，即使其未配备NAVAID/GNSS信号接收机和/或压力传感器，以降低探空测量成本。此类探空仪在1 680 MHz附近频段发射，可通过基站的小型扫描定向天线进行跟踪，该天线远小于403 MHz附近频段探空仪所需的替代天线。不建议使用无气压传感器且无GNSS的探空仪，因为若气球漂移较大（雷达仰角较低），可能导致高层高度/气压出现显著误差。此类情况下，必须使用能接收GNSS信号的探空仪以获取可靠风场数据。403 MHz附近的频段更适用于水平漂移较大的探空业务，能在整个上升过程中提供良好的接收效果和精确的风场数据。

3.5.2 网络密度的差异

WMO已定义并定期审查包括气象辅助设备在内的观测网络的最低全球及区域要求。根据全球基本观测网（GBON）要求（WMO-No. 1160），陆地上空站的无线电探空仪测量所需水平分辨率为500公里，推荐分辨率为200公里。在世界气象组织会员国管辖海域的上空站，所需水平分辨率为1 000公里，推荐分辨率为500公里。

气象辅助业务的频谱需求因国家而异，必须考虑包括国防、环境、救灾组织及航天机构在内的全体用户群体。尽管频谱高效的数字发射机已广泛应用，部分国家仍在使用模拟技术的无线电探空仪。任何频谱需求的估算均需考虑网络密度（较高的网络密度要求更高的频谱效率），以及仍依赖模拟技术的现有无线电探空仪设备的更新换代。

值得注意的是，可由远程站点监控的全自动气球施放系统需求日益增长，目前此类系统已在多地投入运行。这些系统均采用工作在400.15-406 MHz频段的NAVAID/GNSS无线电探空仪。与有人操作相同，若因气球早期故障导致施放失败，探空仪可能持续发射信号。这往往导致短时间内需进行第二次施放。自动化施放系统会在每次施放前扫描400.15 MHz至406 MHz频段，以确保选定频率范围内无其他探空仪正在发射。在此类情况下，必须备有替代频率以保障业务测量的实施。

3.5.3 401-406 MHz频段的使用

欧洲部分国家运行着非常密集的网络，在该频段使用漂移极小且发射带宽窄的无线电探空仪。另一些国家则运行宽带二次雷达系统，即地面站向探空仪发射脉冲，探空仪响应此脉冲并传输气象数据。在这两种情况下，业务运行几乎需要占用400.15-406 MHz全段，因为气象辅助业务必须在401 MHz至403 MHz频段内与EESS（地对空）及气象卫星业务（地对空）的数据收集平台发射进行协调。中国研发了往返漂移探空系统（RDSS），这是一种创新的三阶段观测系统：上升、漂移和下降。400.15-406 MHz频段内的特定信道已分配给该系统使用。

必须指出，部分国家仅有数量有限的施放站。在此类情况下，可能有资源采购发射机，从而腾出部分频段供其他用途。澳大利亚即为一例，该国无需占用全段，主管部门将该频段的一部分用于其他无线电通信业务。WMO认为，在可预见的未来，气象辅助业务仍需占用400.15-406 MHz全段，同时也意识到，由于需与卫星业务进行同频道共享，未来全球范围内可能无法在400.15-401 MHz频段开展标准无线电探空仪业务。

3.5.4 668.4-1 700 MHz频段的使用

1 668.4-1 700 MHz频段的情况不同于401-406 MHz频段。该频段以主用地位同时划分给气象辅助业务和气象卫星业务。然而，同频道的气象辅助业务与气象卫星业务互不兼容，且该频段已出现显著的分割使用。气象辅助设备会对气象卫星地面站造成显著干扰。在讨论1 668.4-1 700 MHz频段的气象辅助业务需求时，必须牢记通常仅有部分频段可供使用。大多数国家可在7-8 MHz带宽内开展业务，但也有若干国家仍需15 MHz以上的带宽以支持业务运行。

需注意，无线电探空仪业务并不覆盖1 668.4-1 700 MHz全段，而是限于1 668.4-1 690 MHz范围。此用法主要见于欧洲，亚洲亦有少量系统在此范围运行。

3.5.5 保留两个频段的要求

每个频段均具备不同类型气象辅助业务运行所需的独特特性。

401-406 MHz频段传播损耗较低，在基站与无线电探空仪间斜距较长的高风区具有优势。较低传播损耗亦允许使用更简单、更小的接收天线进行飞行跟踪。该频段的气象辅助业务采用无线电导航（GNSS）进行测风，因为无线电测向天线将过于庞大。出于预算及/或国家安全原因，部分主管部门使用1668.4-1700 MHz频段。这降低了一次性设备的成本，并使气象辅助系统能够独立于NAVAID/GNSS系统运行。

鉴于各频段的独特性及与其他业务当前的共用条件，气象辅助业务（气象、科研、国防等）无法仅依赖单一频段的可用性。因此，确保两个频段的可用性被视为维持成功气象业务的关键。

3.6 未来趋势

尽管气象辅助设备的设计通常十分简单且采用低成本组件，但其性能的提升已持续发生并将继续推进。为满足特定区域支持不同用户气象及其他环境业务日益增长的频率指配需求，正通过以数字发射机取代模拟发射机，推动射频技术与特性的改进。

此外，在无线电探空仪上应用GNSS进行测风及由GPS高度推导气压，已显著提升NAVAID/GNSS探空仪的频谱效率，同时提高了高空风及高度测量的精度与分辨率。利用GNSS推导气压可省去专用气压传感器，从而降低探空仪的重量与成本。小型低成本GNSS接收机的普及，使得气象辅助设备可在机载端对GNSS信号进行完全处理，仅需传输风场与位置数据。

参考文献

- [1] WMO-No. 8 – Guide to Instruments and Methods of Observation , Volume I – Measurement of Meteorological Variables, [Guide to Instruments and Methods of Observation \(wmo.int\)](https://www.wmo.int/publications/guide-to-instruments-and-methods-of-observation) .
- [2] WMO-No. 1160 – Manual on the WMO Integrated Global Observing System, [Manual on the WMO Integrated Global Observing System](https://www.wmo.int/publications/manual-on-the-wmo-integrated-global-observing-system).
- [3] OSCAR/Surface (<https://oscar.wmo.int/surface/>) .
- [4] WMO-No. 1165 – Guide to the WMO Integrated Global Observing System, [Guide to the WMO Integrated Global Observing System](https://www.wmo.int/publications/guide-to-the-wmo-integrated-global-observing-system).

- [5] Instruments and Observing Methods Report No. 143, Report of WMO's 2022 Upper-Air Instrument Intercomparison Campaign, [Report of WMO's 2022 Upper-Air Instrument Intercomparison Campaign](#).
- [6] Recommendation ITU-R RS.1165 – Technical characteristics and performance criteria for radiosonde systems in the meteorological aids service in the 403 MHz and 1 680 MHz bands.

第4章

气象雷达

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/海上导航。大多数天气雷达是全天24小时持续运行，并在紧急气象和水文警报/预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，用于探测并测量水凝物强度及其径向速度。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，提供降水率数据，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。现代雷达将回波信号数字化，以便通过各类算法生成增强型产品。这些数据和产品通常会被存档，以供研究和历史分析之用。

本章探讨气象领域已部署及即将部署的业务化地基雷达，及其相较于其他雷达的特殊性。

4.1.1 气象雷达类型

第一种也是最广为熟知、应用最广泛的雷达类型是天气雷达。此类雷达提供以其自身位置为中心的立体空间内的数据。大众所熟知的这类雷达的输出结果，常出现在电视天气预报节目中。表4-1列出了天气雷达业务常用的频段。

表4-1

主要天气雷达频段

频段 (MHz)	气象领域通用 波段名称
2 700-3 000 (主要为2 700-2 900)	S-波段
5 250-5 725 (主要为5 600-5 650)	C-波段
9 100-9 700 (主要为9 300-9 500)	X-波段

风廓线雷达（WPR）是另一类重要的气象雷达。此类雷达指向垂直方向，提供雷达正上方近似锥体空间内的风速数据。若配备得当（如加装扬声器单元或无线电声学探测系统（RASS）），风廓线雷达还可测量大气虚温随高度的变化。风廓线雷达所用射频频段通常集中在50 MHz、400 MHz、1 000 MHz及1 300 MHz附近（详见第4.3节）。

气象与海洋学中使用的第三类雷达是海洋高频（HF）雷达。此类雷达工作于HF无线电频段（3-30 MHz），通过布拉格散射现象提取海表信息。海洋雷达可用于沿海地区监测海表流场、波浪及风向。

第四类较为少用的雷达是辅助雷达，用于跟踪飞行中的无线电探空仪。此类雷达的应用已在第三章（无线电探空仪相关内容）中论述。

气象领域应用的第五类雷达是云雷达。此类雷达通常工作于35 GHz及94 GHz附近，相较于S、C或X波段雷达系统，其对较小水凝物（如雾）具有更高灵敏度。云雷达用于研究云及其他粒子在雷达系统灵敏度范围内的微物理特性。

所有雷达均通过发射无线电信号并接收来自目标（如车辆、飞机、雨滴或大气湍流）的反射信号进行工作。尽管发射功率强大，雷达回波信号却十分微弱。这是因为辐射信号需往返两次穿越路径 – 从雷达到目标再返回雷达，导致双向路径均产生大气衰减。就气象雷达而言，此弱点更为突出，因为气象目标（无论是降水粒子（雨、雹、雪等），抑或在多普勒模式下，尘埃、昆虫乃至单纯的大气扰动）本质上并非高效反射体。回波信号强度与目标反射率相关，并随目标尺寸与性质而变化。为克服这些探测挑战，雷达系统采用几项关键策略：提高发射功率、采用具有高增益波束宽度积的大型天线、使用极高灵敏度的接收机，以及延长信号积分时间。为实现有效探测，相对“安静”的频谱环境 – 即无人造电子噪声与干扰 – 是一项关键需求。

4.1.2 气象应用雷达方程

对于探测离散目标的常规雷达，简单雷达方程表明雷达接收的回波功率取决于单个目标的雷达截面，且与 $1/r^4$ 成正比，其中 r 为雷达与目标间的距离。然而，该方程并不直接适用于气象雷达，后者旨在探测分布于脉冲波束体积内的大量散射体（通常为降水粒子）。

针对气象雷达应用，公式（4-1）描述了回波功率与雷达及目标特性之间的关系，可表述如下：

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

式中：

$\bar{P}_r$ ：平均返回功率（W）

P_t ：发射机输出功率（W）

G ：天线增益（无量纲）

θ ：天线半功率（3 dB）波束宽度（弧度）

c ：光速（m/s）

τ ：脉冲宽度

L ：与传播及接收机检测相关的损耗因子

Z ：有效雷达反射率（ m^3 ）

K ：复折射指数（无量纲）

λ ：雷达波长（m）

r ：目标距离（m）

重新整理各项, 可得易于理解的雷达方程(4-2)形式, 该式按常数、雷达因子和目标因子分项展示了对接收功率的不同贡献:

$$\bar{P}_r = \frac{\pi^3 \cdot c}{1024 \cdot \ln 2} \cdot \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \theta^2 \cdot \tau \cdot L}{\lambda^2} \cdot |K|^2 \frac{Z}{r^2} \quad (4-2)$$

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

当满足以下假设时, 方程(4-2)可应用于分布式目标:

- 目标占据整个脉冲体积
- 粒子遍布整个有效区域
- 降水粒子为直径远小于雷达波长的均匀介质球体
- 粒子尺寸满足瑞利散射条件
- 在考虑的体积 V 内, 介电常数 $|K|^2$ 及散射体的尺寸分布均匀
- 天线方向图可近似为高斯形状
- 入射波与后向散射波均为线极化
- 忽略多次散射效应

雷达方程(4-2)的对数形式[Doviak和Zrnica, 1984]如公式(4-3)所示。

$$Z(Az, E1, R) \text{ (dBz)} = 10 \log(P_r) + 20 \log(R) - 10 \log(L_p) + 10 \log(C) \quad (4-3)$$

该方程最为实用, 因其阐明了为获得经校准的反射率测量值, 必须明确识别各项系统参数。这些参数包括:

- 接收功率 P_r (W),
- 距离 R (m),
- 方位角与仰角 (度),
- 额外传播损耗 L_p (dB), 和
- 所谓雷达常数 C 。

雷达常数通常包含天线波束宽度、脉冲宽度、接收机变换增益及系统损耗等因素。

如上所述, 气象雷达的方程截然不同, 因为其目标(如降水)需填充整个狭窄雷达波束(如前所设)。此时雷达方程给出的接收信号与 $1/r^2$ 成正比。因此, 气象雷达可实现更大的探测距离, 但也意味着其相较于典型空中交通管制雷达对干扰更为敏感。

4.2 天气雷达

4.2.1 用户需求

气象工作者利用天气雷达探测、定位并测量云内或云底降水的强度, 同时通过降水或大气粒子的移动确定风速与风向。雷达可测量特定时段内的降水强度, 以及降水或大气粒子朝向或远离雷达天线的运动。这使得气象事件中的旋转模式得以被探测, 这是识别龙卷风或突发洪水等严重天气事

件的关键因素，并最终改进预警系统。天气雷达的主要用户需求是探测固态与液态降水，估算降水率及径向速度⁵。

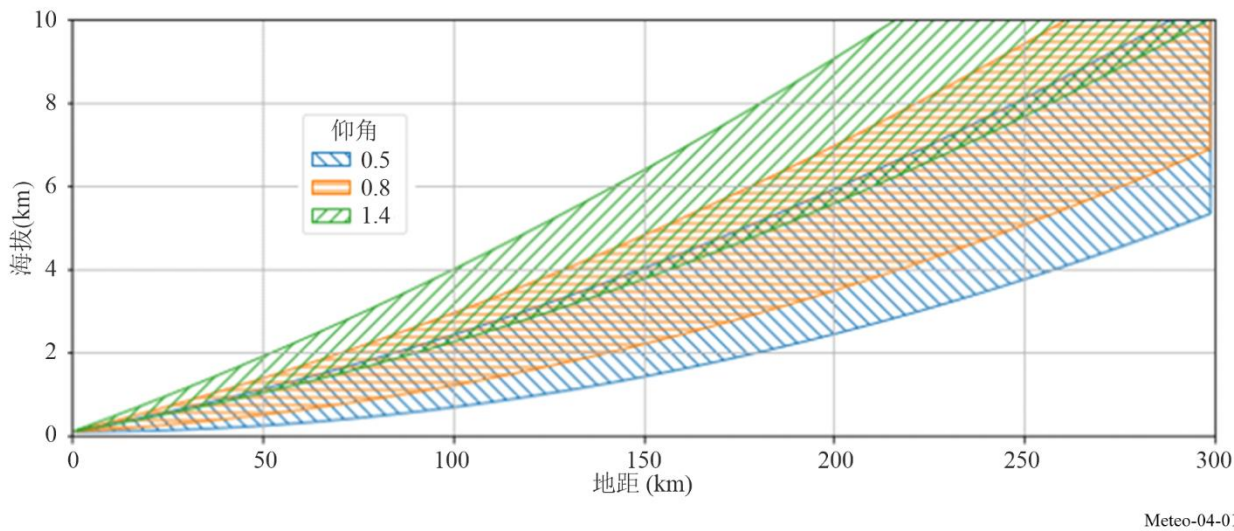
4.2.2 天气雷达网络

天气雷达的主要局限在于，特定气象事件返回的回波强度往往随距雷达距离的增加而减弱。这不仅源于自由空间及其他大气衰减，还因为随着距离增加，雷达波束抬升高度增加（这是由地球曲率及波束仰角所致），且波束展宽。（参见图4-1，展示了波束宽度为1度的雷达在0.5度、0.8度和1.4度仰角下的前三次扫描。注意如图4-1所示，扫描区域可能存在重叠。）

这导致波束照射到的气象事件占比下降。虽然事件的上部仍可被雷达观测到，但其下部可能不再可见。发生在距雷达一定距离外的降水可能无法被探测到，或显示强度减弱，从而限制了雷达的定量业务探测范围。

图4-1

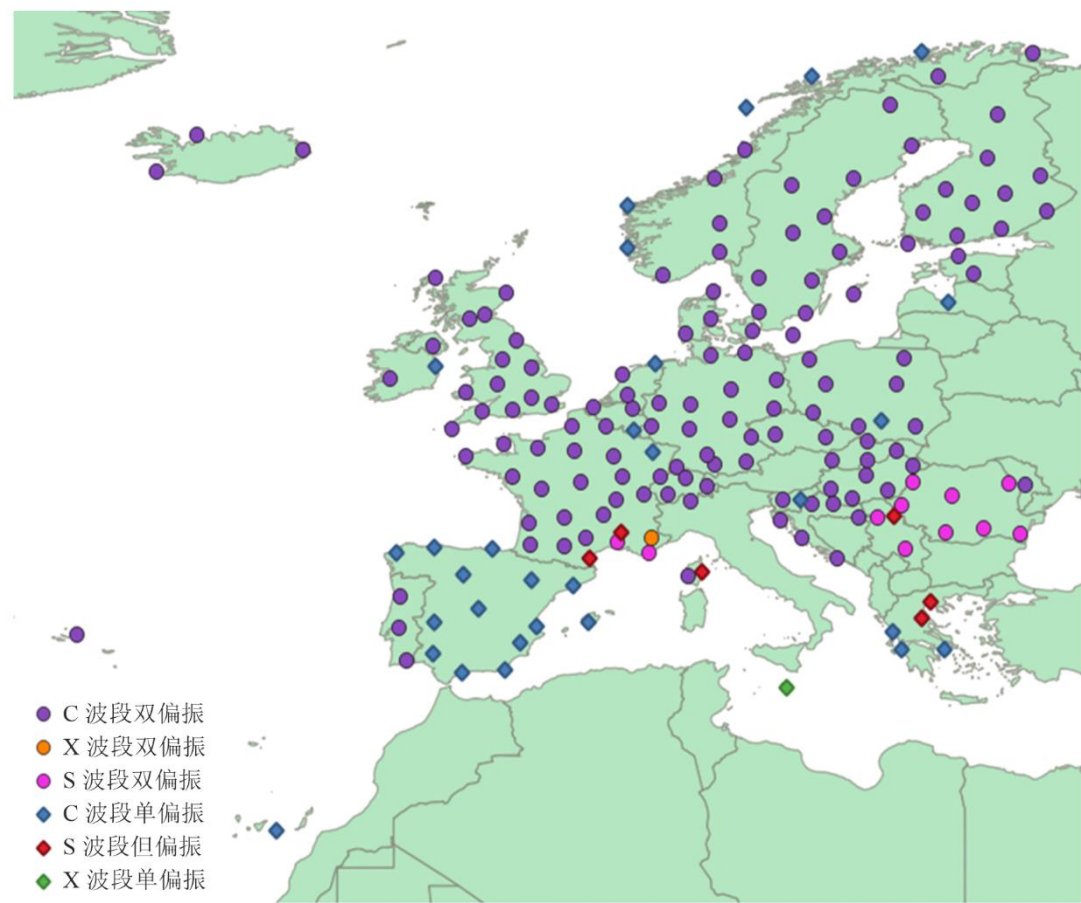
三次连续雷达扫描的高度与距离



为克服此限制，通常将多部雷达等间距布设组成分布式网络。此类网络全天24小时运行，通常覆盖国家或甚至大陆部分区域等大范围地区，以探测并追踪气象现象的演变，从而实现早期灾害天气预警。图4-2展示了西欧部署的一个由S波段、C波段及X波段雷达组成的此类网络。

⁵ 此为降水粒子沿径向（即朝向或远离雷达方向）的运动速度，不包含降水强度的信息。朝向雷达运动的降水速度为负，远离雷达运动的降水速度为正。沿雷达波束垂直方向（即绕雷达作圆周运动）的降水，其径向速度为零。

图4-2
天气雷达网络示例
(EUMETNET-OPERA, 2025年1月更新)



Meteo-04-02

4.2.3 反射率的业务应用

反射率是雷达术语，指雷达目标返回能量的能力。降雨反射率 η 与水相对介电常数 Σ_r 、雨滴直径 D 及波长 λ 相关。对于所考虑体积 V 内的雨滴，反射率可表示为公式（4-4）：

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

式中， $|K|^2$ 对于液态水为0.93，对于冰为0.18。反射率用于估算降水强度和降雨率，是衡量回波功率的指标。

对于已知（或假定）雨滴尺寸的降水事件，体积反射率可与单位体积内的总液态水体积相关联。总水量结合滴谱分布及相应的雨滴下落末速度，可便于计算降雨率。

雷达反射率因子 Z 定义为：

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

式中：

- Z : 由体积内球体总数对应的散射雷达截面所隐含的体积
- D : 水滴直径

V_e : 有效水滴体积

体积 Z 与单位体积雷达截面 η 的关系为:

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

式中:

Z : 体积

η : 单位体积雷达截面

λ : 入射波长

$|K|$: 复折射指数

由于散射体积内雨滴直径并不均匀, 雨滴分布可近似表示为:

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

式中:

$N(D)$: 直径为 D 的数浓度

D : 直径

ΛD : 尺度间隔

N_0 和 Λ : 给定气象事件的常数。

当雨滴尺寸分布已知时, 单位体积上的求和 $\sum D^6$ 由下式给出:

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

当垂直风速为零时, 降雨率 R 由下式给出:

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

式中:

R : 降雨率

D^3 : 与 Z 成正比的雨滴体积

$v_t(D)$: 直径为 D 的雨滴下落末速度

ρ : 水的密度

当 N_0 为常数时, 隐含的 Z - R 关系可由公式(4-10)描述:

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

其中 Z 通常以 $\text{dBZ} = 10 \log Z$ (mm^6/m^3) 表示, A 和 b 为常数(A 为散射常数, b 为速率乘数)。最常用的 Z - R 关系是马歇尔-帕尔默关系: $Z = 200 \cdot R^{1.6}$, 其中 Z 和 R 分别以 mm^6/m^3 和 mm/h 为单位。然而, Z - R 关系并非唯一。 A 和 b 均取决于滴谱分布, 而滴谱分布随降雨类型和强度变化。

4.2.4 天气雷达发射方案、扫描策略与业务模式

4.2.4.1 发射方案

为确保体扫处理, 在所谓的“扫描策略”(通常耗时5-15分钟)中, 气象雷达在不同仰角采用多种不同的发射方案, 运用不同的脉冲宽度、PRF和转速组合。并不存在单一的“典型”方案, 方案会因雷达性能、所需气象产品对应的雷达环境等多种因素而异。因此, 方案需经调整以最优满足需求。

例如，气象雷达呈现的各类发射方案参数范围如下：

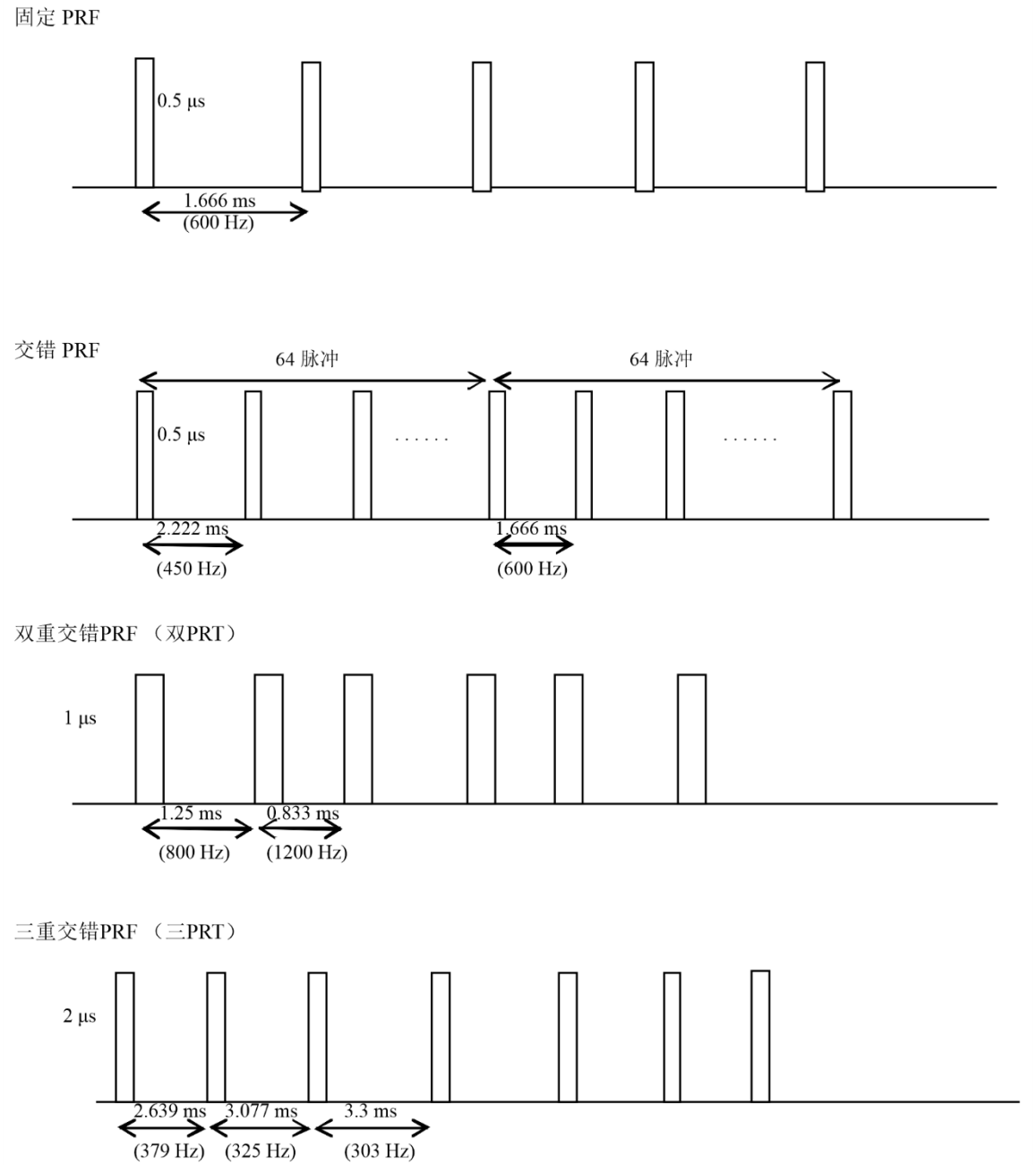
- 业务仰角范围：0°至90°

对于非压缩脉冲，传统真空管发射机（磁控管和速调管）雷达的典型配置，其脉冲宽度（业务雷达）范围为0.5至3.3微秒。部分采用固态发射机的雷达使用脉冲压缩技术，脉冲宽度范围为30至200微秒（需注意，脉冲压缩的使用会使3 dB带宽增至10 MHz）
- 脉冲重复频率（PRF）范围为250至2 400 Hz（业务雷达）。部分现役雷达PRF可达20 000 Hz
- 转速范围：1至10转/分
- 在同一雷达上混合使用不同脉冲宽度和PRF的发射方案，特别是采用固定、交错或穿插的PRF（即在单一方案中使用不同PRF）
- 对于采用相位相干发射机（速调管或固态）的雷达，使用不同的发射脉冲相位编码方案，如恒定相位、随机相位，或专为辅助二次回波恢复设计的特定编码（如SZ8/64）。

图4-3提供了不同发射方案的示例。

图4-3

若干天气雷达发射方案类型



Meteo-04-03

这些不同的发射方案被应用于多部雷达的扫描策略中，在扫描过程中，针对不同仰角和转速发射一种发射方案。

必须强调，不同雷达间，与上述示例方案相关的PRF和脉冲宽度数值在上述定义范围内各有差异。此外，对于给定的方案，脉冲宽度亦可逐脉冲变化。

以下为此类扫描策略的一个示例。

图4-4

一种天气雷达扫描策略描述

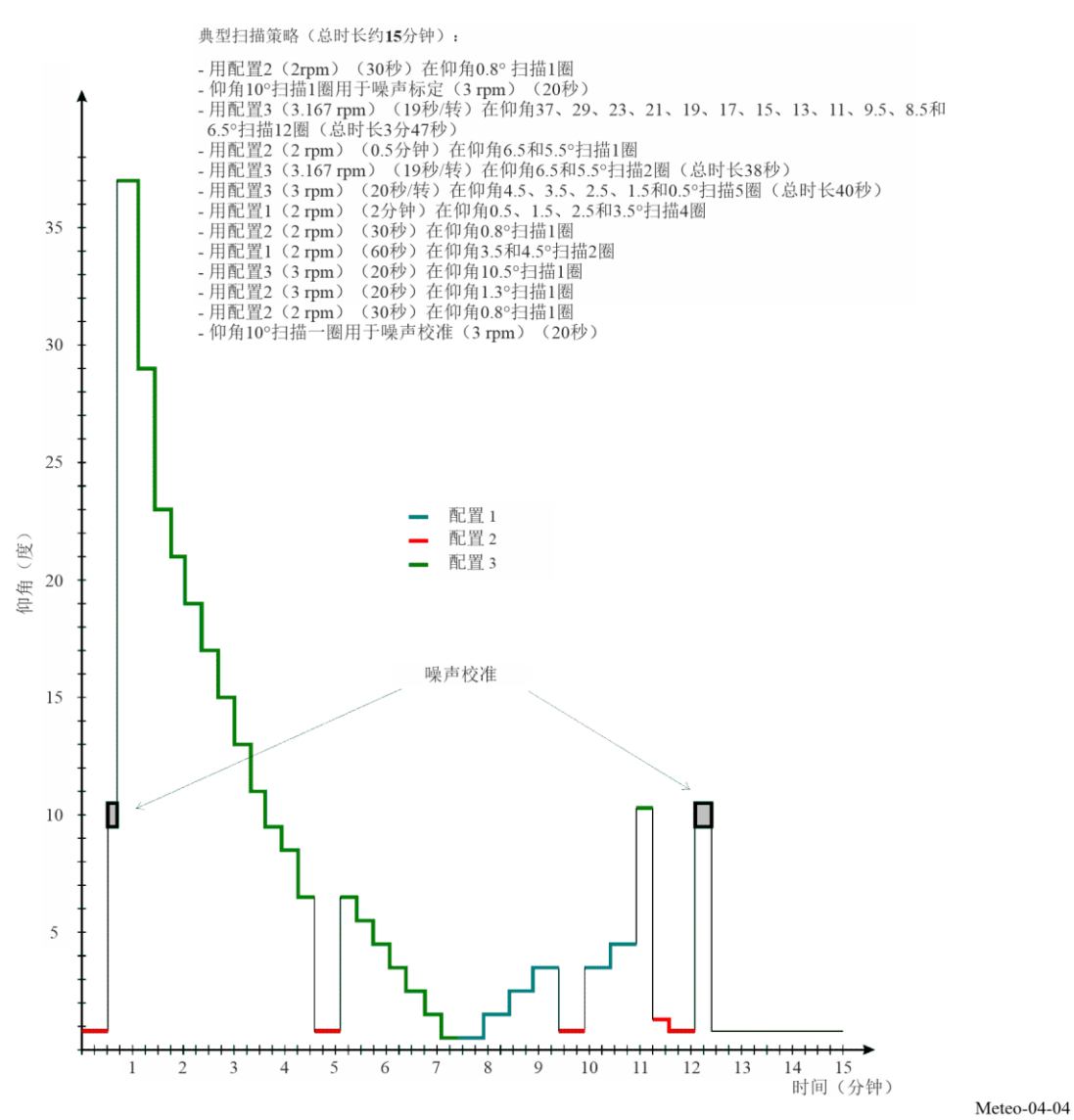
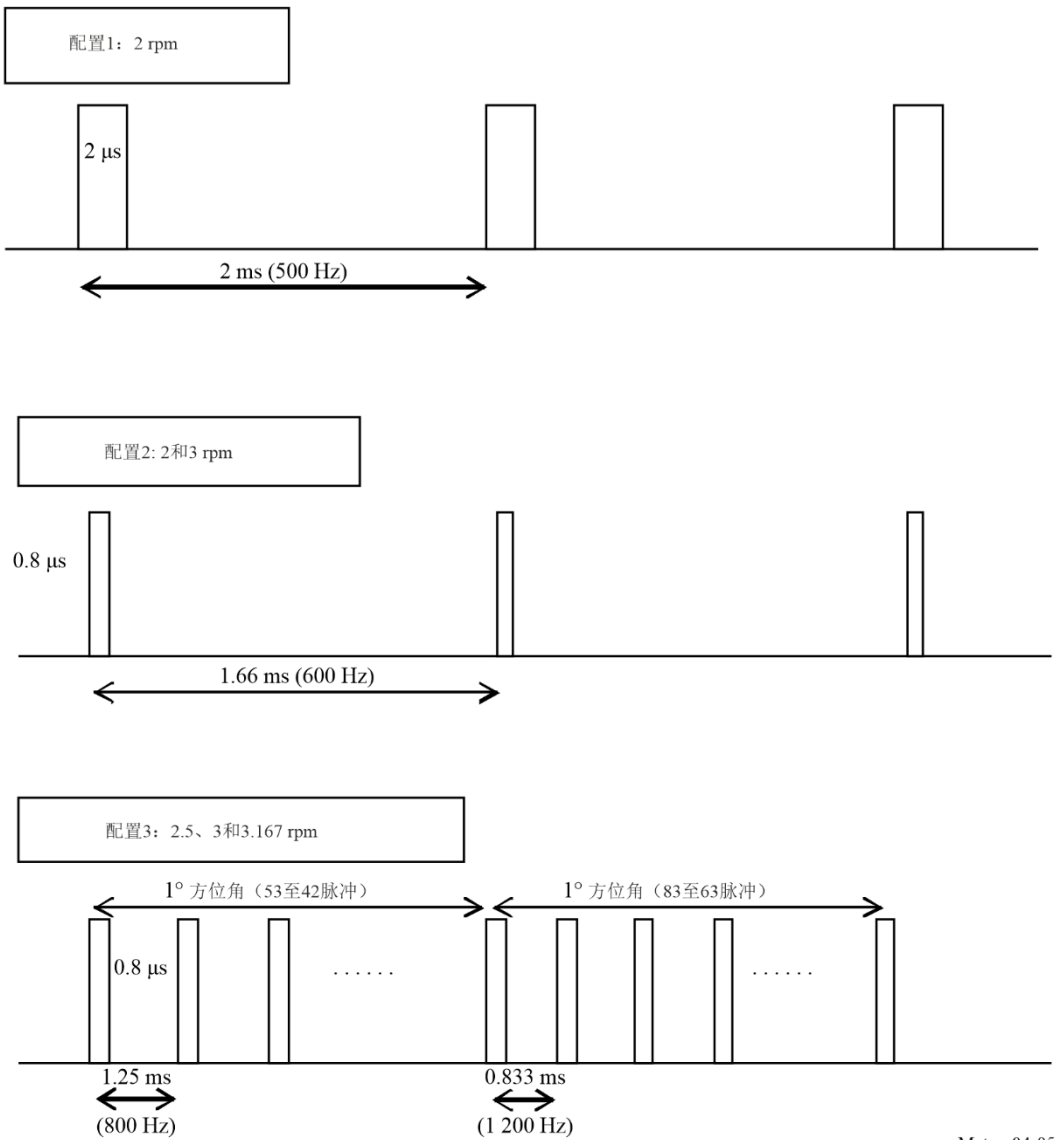


图4-5
与图4-4所示扫描策略对应的发射方案



Meteo-04-05

4.2.4.2 噪声校准

考虑到气象雷达回波信号的微弱性，必须从信号中提取噪声水平，以实现最精确的测量并反演相关的气象产品。

记 N 为噪声水平， S 为有用信号（即气象回波信号），气象雷达执行以下过程：

- 1 对于每个距离门，雷达测量到的回波信号对应于有用信号（ S ）和噪声（ N ），即 $N + S$
- 2 为获得 S ，雷达从 $N + S$ 中提取噪声水平 N
- 3 随后，基于 S ，雷达能够确定所有气象产品，例如通过多普勒分析得到的降水量（dBz）或风速。

为获得更精确的气象产品，信号 S 必须尽可能准确，这意味着雷达的噪声校准，亦称“零检查”，是一个关键问题。

因此，“零检查”需定期进行，可在常规雷达发射期间（通过估算）或特定测量时段内进行（见下文示例扫描策略），在此期间对噪声进行测量。

噪声校准测量通常在无雷达发射的情况下进行，这可能对旨在检测雷达信号以减轻干扰的某些无线电系统的设计产生影响。

在任何情况下，噪声校准期间接收到的干扰都将系统性地破坏所有后续数据采集，直至下一次无干扰校准完成。此类干扰可能导致降水率被低估，低于实际情况，从而对业务运行和预警流程产生明显影响。

4.2.4.3 气象雷达的工作模式

某些网络中的雷达，例如美国的NEXRAD，以两种用户可选模式运行：晴空模式和降水模式。降水模式可在运行期间的任何时刻手动选择，或在天气雷达检测到降水时（基于预定的反射率值和覆盖面积）自动运行。雷达可手动切换回晴空模式，或在未检测到降水时（基于预定的面积阈值覆盖和时间持续值）自动切换。

通常，气象雷达会同时利用这两种模式。

4.2.4.3.1 晴空模式

晴空模式使气象雷达能够探测降水活动的早期迹象。

低层风速和空气密度的某些变化可用于潜在降水的探测。雷达利用慢速扫描速率配合低PRF，以实现高灵敏度能力。这种高灵敏度非常适用于探测远距离大气状况的细微变化。当雷达发射范围内几乎没有或对流活动极少时，晴空模式尤为有用，且非常适于探测发展中的雷暴或其他类型严重天气以及小雪的迹象。

气象雷达的高灵敏度源于晴空模式下的体积扫描模式。通过在晴空模式下选择一种扫描模式，雷达天线能够在任意给定空间体积内延长驻留时间并接收多个回波，同时允许在低信噪比（S/N）下运行。该配置结合了两项关键参数：用于增加能量发射的宽脉冲宽度和用于延长监听时间的低PRF。这些特性共同为给定的反射率dBz值提供了约8 dB的额外回波功率，显著提升了弱大气信号的探测能力。

4.2.4.3.2 降水模式

降水模式的作用与晴空模式截然不同。降水模式的扫描速率是高程角的函数。这种依赖关系使得在对整个雷达探测体积进行采样时，能够采用尽可能多的高程角。降水模式利用多种体积覆盖模式（VCP）来实现具有不同高程采样的各类扫描策略（参见第4.2节示例）。降水模式专门针对包括对流风暴（如冰雹、强雷暴、龙卷风）、强降水事件及大尺度天气系统在内的天气现象。

4.2.4.4 固定回波消除

所谓的固定回波包含若干隐蔽的固定分量；其一包含低频散射，其二包含较高频率分量（例如由风吹植被扰动所致）。由非降水目标产生的回波被称为杂波，应予消除。当前天气雷达采用不同的地物杂波抑制方法：

- 多普勒滤波使用高通滤波器来减弱低速地物杂波。若径向风速高于多普勒滤波器的截止频率，则该过程有效。

- 统计滤波利用反射率方差差异来区分降水（高时/空变率）与地物杂波（统计稳定的回波），因为降水的方差高于地物杂波反射率的方差。即使降水径向速度为零（切向降雨），统计滤波过程依然有效。
- 利用极化雷达进行降雨与地物杂波的判别。

4.2.5 多普勒雷达

自20世纪70年代初起，多普勒天气雷达便被用于大气研究，以测量雷暴内的对流并探测飑锋，如今已广泛应用于业务天气雷达系统。与早期的雷达不同，多普勒设备不仅能确定反射目标的存在与位置，还能测定其径向速度。这使得测量风速、探测龙卷风以及利用速度方位显示扫描测量风场成为可能。

地物杂波抑制是一项重要能力。该领域的新发展聚焦于相干发射机，例如速调管（当今最先进的技术）、行波管（TWT）或固态发射机。传统雷达的频谱相位纯度受限于上一代磁控管技术，但在现代磁控管中，相位纯度已足以实现有效的杂波对消。然而，现有磁控管能以经济的方式提供高平均功率，从而提高信噪比。

4.2.6 双偏振雷达

极化雷达或双偏振雷达可同时发射水平（h）和垂直（v）偏振脉冲。该技术通过遥感散射体的形状与均匀性来识别它们。与非极化系统相比，这类雷达在降雨估计、降水分类、数据质量及天气灾害探测方面均有显著改进。

当前的降水估测利用了下落雨滴趋于扁平（扁球体）这一事实，且其扁平程度随水平方向上滴的增大而增加。结合反射率和双偏振场，能够更好地评估方程（4-10）中Z-R关系的系数A和b。其他基于差分相位 $\varphi_h - \varphi_v$ 和差分衰减的算法，被认为在进一步改善降雨精确评估方面极具前景。

除形状外，水成物还以其频率相关的介电常数为特征，这是计算散射截面和衰减截面的主要因素。水成物的介电特性随雷达频率变化，其中液态水与冰的差异尤为显著。利用这些特性，已实施相关算法，通过差分衰减测量来区分雨雪，并量化云中的液态水与冰含量。

4.2.7 常规气象雷达基数据产品

多普勒气象雷达从信号回波中生成三类基数据产品：基本反射率、平均径向速度和谱宽。所有更高级产品均由这三类基产品生产。基产品的精度通常被列为雷达设计的主要性能要求。若无法达到表4-2所列的这一底层所需精度，则无法实现更高级派生产品的精度。

表4-2

代表性气象雷达基数据精度要求

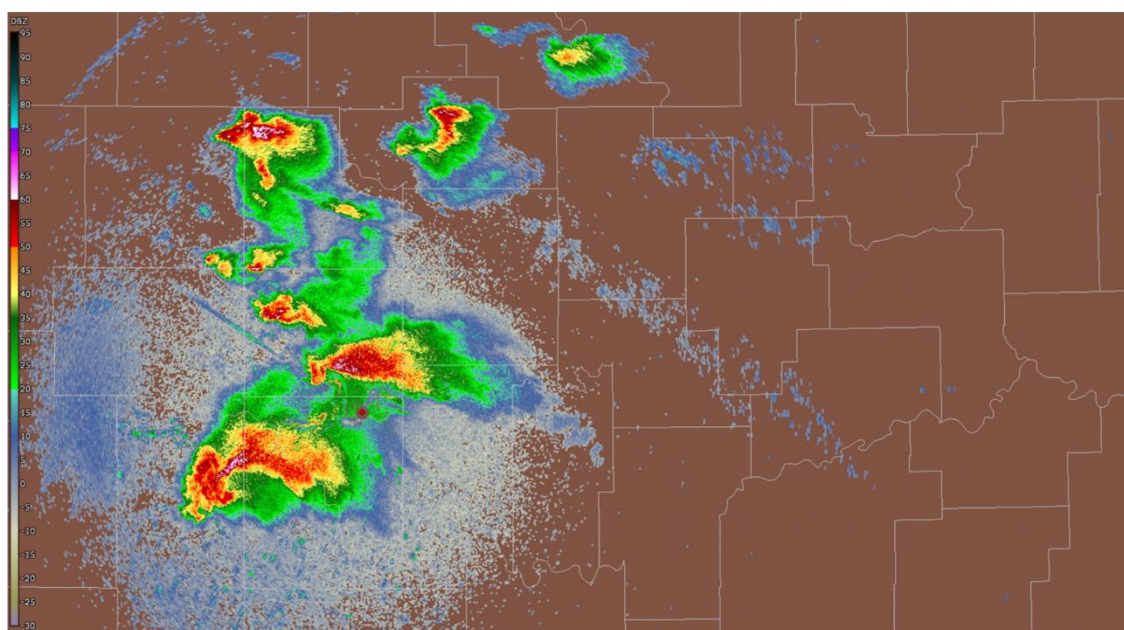
基数据产品	设计精度要求
基本反射率	< 1 dB
平均径向速度	< 1 m/s
谱宽	< 1 m/s

4.2.7.1 基本反射率

基本反射率应用于多种天气雷达场景，其中最重要的是降雨率估计。基本反射率是回波脉冲的强度，由回波功率的线性平均值计算得出。任何对雷达的干扰都会叠加到回波脉冲功率上，从而使反射率值产生偏差。若偏差超出基数据精度要求，反射率测量将失效。

图4-6

2023年4月20日00:10 UTC KTLX站观测到的龙卷爆发期间广泛性超级单体的示例



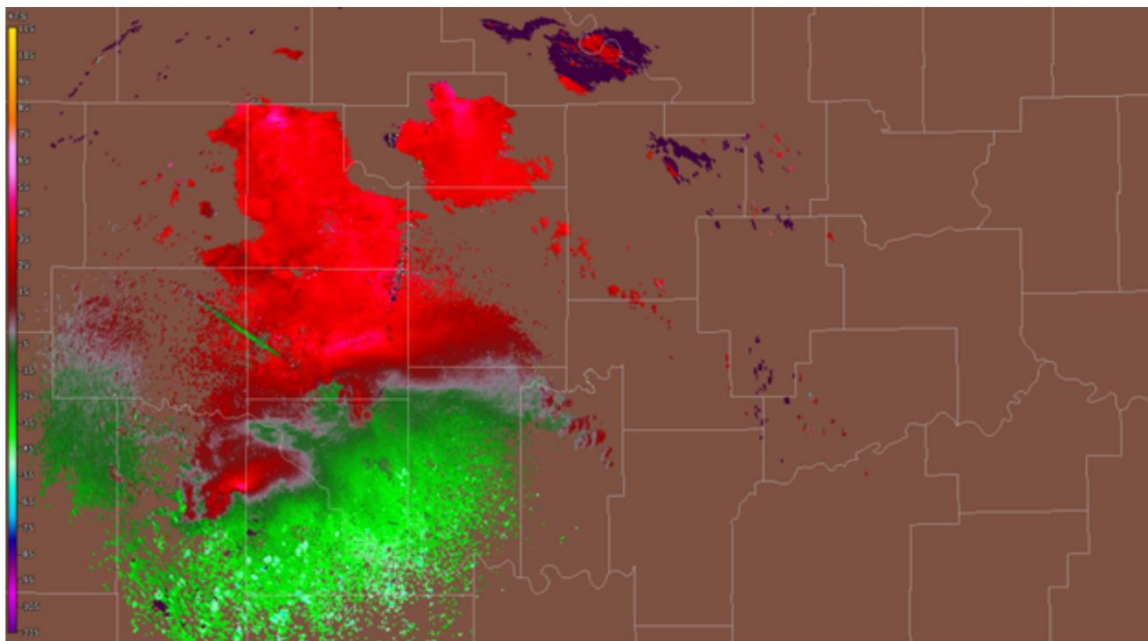
Meteo-04-06

4.2.7.2 平均径向速度

平均径向速度亦称平均多普勒速度，代表给定体积采样内目标的反射率加权平均速度。作为多普勒谱密度的一阶矩，该基数据产品通常通过分析单滞后复自相关函数，由多个连续脉冲推导得出。复协方差辐角提供了连续雷达脉冲间多普勒信号矢量角位移的估计值。多普勒矢量角速度等于该位移除以脉冲间隔时间。完整的多普勒谱描述了分辨体积内径向速度的完整分布，其中各速度分量由目标反射率和雷达波束加权函数共同加权。

图4-7

2023年4月20日00:10 UTC KTLX站观测到的龙卷爆发
期间广泛性超级单体的平均径向速度示例



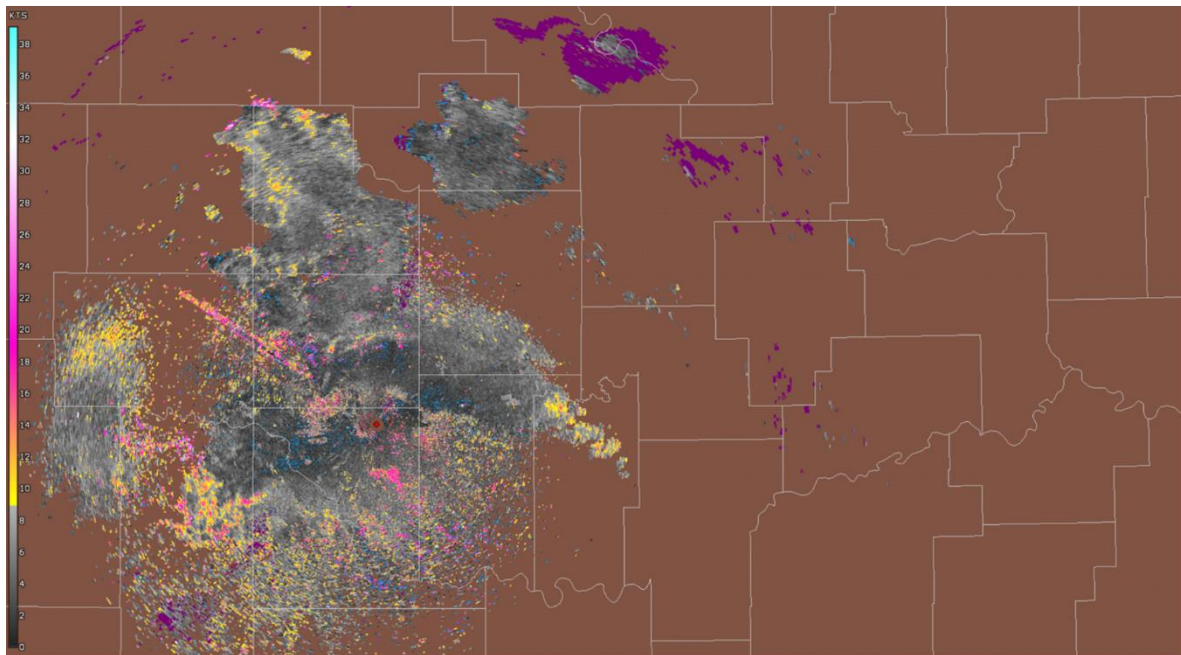
Meteo-04-07

4.2.7.3 谱宽

在气象雷达系统中，谱宽是在假设高斯谱密度的基础上由单滞后相关性推导得出的。它是雷达采样体积内速度离散度的度量，即速度谱的标准差。谱宽取决于脉冲体积内的反射率和速度梯度，以及脉冲体积内的湍流[Doviak和Zrnica, 1984]。

图4-8

2023年4月20日00:10 UTC KTLX站观测到的龙卷爆发
期间广泛性超级单体的谱宽示例



Meteo-04-08

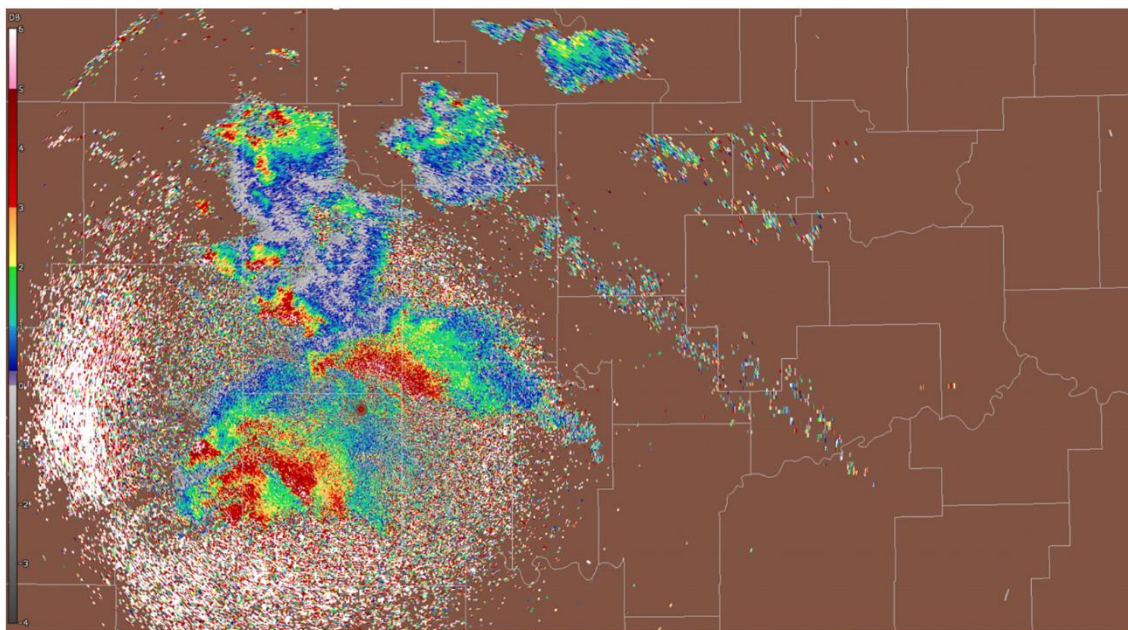
4.2.7.4 双偏振气象雷达产品

4.2.7.4.1 差分反射率

差分反射率是一种基本的极化雷达产品，定义为水平与垂直反射功率回波的比值。除其他用途外，它是粒子形状的良好指示器。而粒子形状又是平均粒径的良好估计量。

图4-9

2023年4月20日00:10 UTC KTLX站观测到的龙卷爆发
期间广泛性超级单体的差分反射率示例



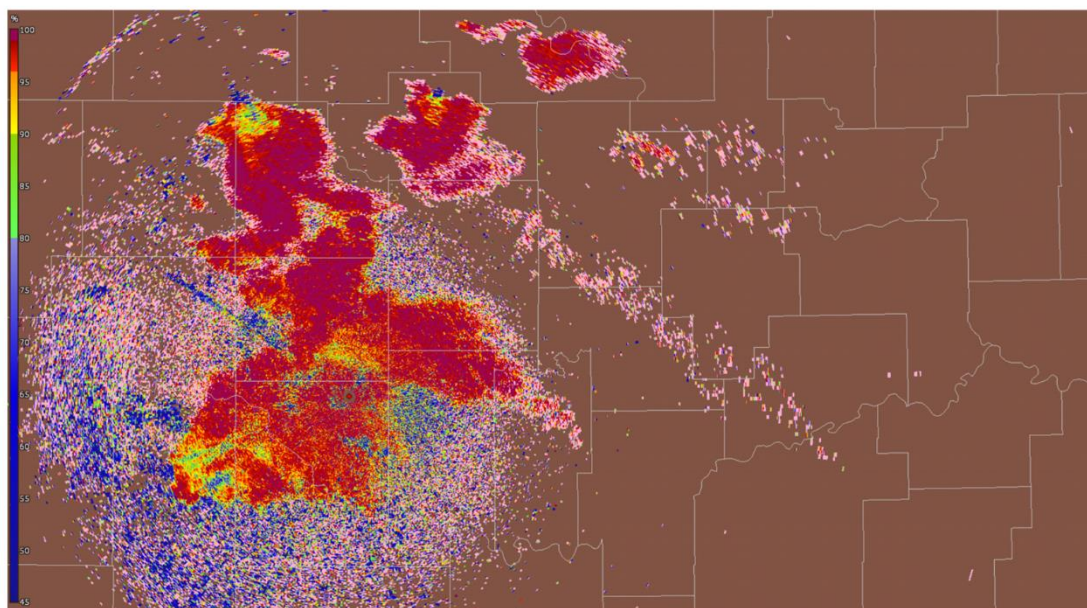
Meteo-04-09

4.2.7.4.2 相关系数

相关系数是一种极化气象雷达产品，表征水平（H）与垂直（V）极化回波信号之间的统计相关性。相关系数描述了水平与垂直极化回波的后向散射特性的相似性。它是识别雨雪等多种降水类型混合区域的有效指标。

图4-10

2023年4月20日00:10 UTC KTLX站观测到的龙卷爆发
期间广泛性超级单体的相关系数示例



Meteo-04-10

4.2.7.4.3 线性去极化比

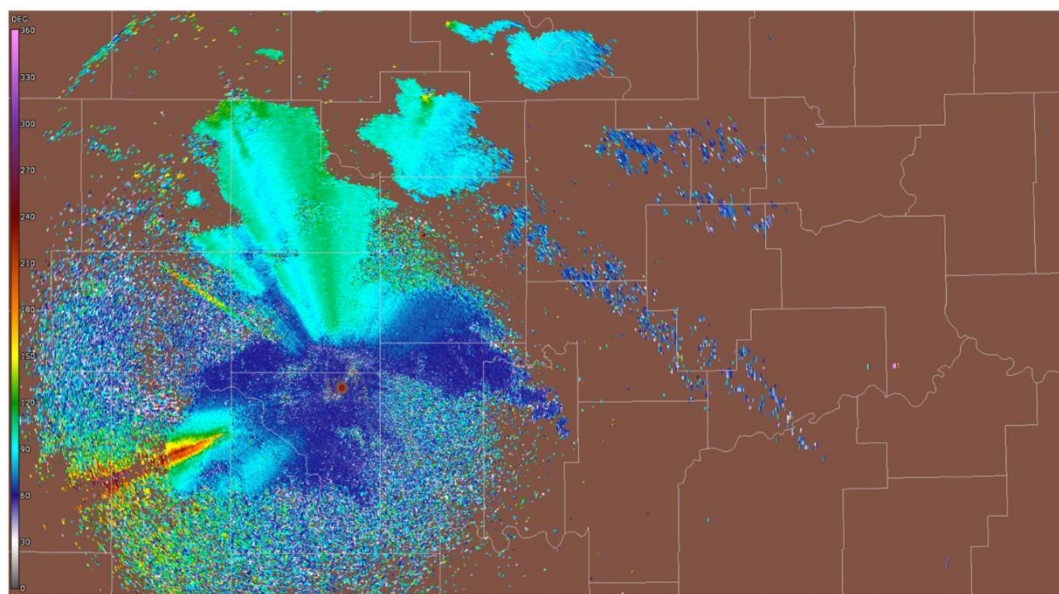
另一种极化雷达产品是线性去极化比，其定义为正交极化接收功率（H发射的V接收，或V发射的H接收）与同发射极化相同的接收功率之比。与相关系数类似，它也是识别多种降水类型混合区域的有效指标。

4.2.7.4.4 差分相位

差分相位用于比较水平与垂直脉冲间的返回相位差。该相位差源于水平和垂直极化波沿传播路径的波周期数（或波长）差异。切勿将其与由云和降水粒子运动引起的多普勒频移混淆。差分反射率、相关系数和相关系数均依赖于反射功率，而差分相位则是一种“传播效应”。它同样是降雨率及降雨引起衰减的优良估计量。由差分相位导出的比差分相位（未图示）显示了相位变化的速率，这对于识别强降雨区域尤为有用。

图4-11

2023年4月20日00:10 UTC KTLX站观测到的龙卷爆发
期间广泛性超级单体的差分相位示例



Meteo-04-11

4.2.7.5 派生数据产品

处理器利用基数据产品为雷达用户生成更高级别的派生数据产品。本文件不详细讨论派生数据产品，因其因雷达而异且数量庞大。为确保派生数据产品的准确性，必须精确维护基数据产品。

4.2.8 天线方向图与天线动态

4.2.8.1 Antenna patterns 天线方向图

气象雷达通常采用抛物面反射体天线，以产生笔形波束天线方向图。为实现体积扫描，需考虑天线在水平和垂直平面内的动态特性。此类动态特性的示例见上文第4.2.4.1节。

目前使用的气象雷达天线方向图数学模型主要有三种，分别载于ITU-R F.699建议书（峰值旁瓣）、ITU-R F.1245建议书（平均旁瓣）及ITU-R M.1652建议书。尽管这些建议书代表了抛物面天线的典型特性，但其对笔形波束天线方向图波束宽度的估计往往略偏高。

需注意，目前ITU-R尚未定义适用于此类笔形波束天线的雷达天线辐射方向图方程。

4.2.8.2 体积扫描天线运动

为实现体积扫描所需的水平覆盖以进行水平扫掠，需使天线在恒定仰角下于水平面内旋转。每次水平扫掠后，天线仰角按预设增量调整。最低仰角通常在 -2° 至 1° 范围内，最高仰角则在 20° 至 30° 范围内，某些应用可使用高达 60° 的仰角。进行差分反射率校准（Zdr）时，天线通常指向 90° 仰角并至少旋转 360° ，称为鸟浴扫描。天线转速随天气状况及当时所需产品而变化。为优化性能，会对转速、仰角范围、中间仰角步进及脉冲重复频率进行调整。较慢的天线转速可提供较长的每径向驻留时间，从而获得最大灵敏度。

当需要尽快覆盖整个体积时，较高的天线转速可使操作人员在短时间内生成体积扫描。通过改变仰角步进和转速，体积扫描的采集时间可从一分钟到15分钟不等。与其他在恒定仰角下旋转的雷达相比，完成一次完整体积扫描耗时较长，这是由于必须获得具有统计显著性的采样结果。

4.2.8.3 其他天线运动策略

气象雷达亦采用其他天线运动策略以满足特殊应用及研究需求。

常见策略包括：

- 扇形扫描：获取部分仰角切割数据；或扇形体积扫描：在不同仰角下对360°方位扫掠的一部分进行体积扫描。
- 单指向扫描：天线保持在固定方位角和仰角，以监测大气中特定点。
- RHI或“距离高度指示”扫描：天线保持在固定方位角，仅改变仰角进行扫掠，以获取单一方位上的详细垂直信息。
- 栅格扫描：在由固定方位角和仰角界定的小型矩形区域内，以锯齿形模式进行扫描。此类扫描常用于太阳观测，作为太阳定标活动的一部分。

4.2.9 当前及未来的频谱需求

与许多雷达应用一样，频段（或波长 λ ）的选择主要是在与 λ^{-4} 成正比的探测距离/反射率、降雨衰减、气象变量精度及成本之间进行权衡。降水引起的衰减随 λ 增大而减小，在分米级波长时可忽略不计，这是一项主导考量因素。Ka波段（约35 GHz，波长8.6 mm）非常适合探测非降水云中的小水滴。S波段（2 700-3 000 MHz，波长10 cm）则适用于热带和温带气候下远距离（可达300 km）探测强降雨。

4.2.9.1 天气雷达频段

气象雷达最常用的三个频段是S波段（2 700-3 000 MHz）、C波段（5 250-5 725 MHz）和X波段（9 100-9 700 MHz）。

S波段（2 700-3 000 MHz，标称波长10 cm）在定量精度和远程性能方面总体为最佳选择。这是因为其在气体吸收和降水衰减方面的衰减值均较低（Fabry, 2015; Doviak, 1993）。较长的波长也有利于缓解距离-多普勒模糊问题（Doviak, 1978和1979）。然而，成本是选择S波段的一个考量因素，因为对于给定的波束宽度和增益要求，较长的波长需要更大的硬件组件和天线。

C波段（5 250-5 725 MHz，波长5 cm）通常用于温带气候，以及地理覆盖面积较小的国家。它可作为上述参数间的相关折衷方案，支持远距离（可达200 km）降雨探测（尽管其定量能力实际上在超过100 km后受限），但相较于具有相同空间分辨率的低频雷达，其优势在于因功率较低和天线尺寸较小而带来的成本降低。

X波段（9 100-9 700 MHz，波长3 cm）天气雷达灵敏度更高，可探测更小的粒子，但由于衰减较大，仅用于极短距离的天气观测（约50 km）。此类雷达用于云发展研究，因其可探测微小的水粒子，亦用于探测小雪等弱降水。此外，鉴于其体积小，X波段天气雷达常被用作移动便携式设备。这些雷达亦用于探测风场变化，特别是航空用途（风切变、涡流等）。

4.2.9.2 衰减

电磁波在穿过大气传播时，会受到水汽、气体吸收、云和降水的衰减（Fabry, 2015）。迄今为止，最主要的衰减是由降水，尤其是强降雨引起的。传播物理特性表明，C波段（5 cm）的衰减率（单位长度的dB值）约为S波段（10 cm）的6至8倍，具体取决于降雨率[Bean和Dutton, 1966, Burrows和Attwood, 1949]。X波段的衰减问题更为严重，在降雨率为6 mm/h时，其衰减率超过S波段的100倍，是C波段的15倍以上。

文献中充分记载了较短波长下大气衰减的严重影响。20世纪80年代，国家强风暴实验室对5 cm和10 cm雷达的性能进行了直接对比，这些测试表明，在强降雨中使用5 cm波长会严重影响强风暴预报和预警业务（Allen, 1981）。

由于对功率测量精度的严格要求，较短波长的衰减校正面临重大技术挑战（Hitschfeld, 1954）。为支持衰减校正算法，C波段和X波段所需的反射率校准精度超出了美国下一代天气雷达（NEXRAD）计划的现行要求，且在实践中难以实现。极化技术引入天气雷达后，情况大为改观，因为差分相位提供了衰减估计值，而这并不依赖于反射率校准的精度。

一个与之相关的衰减问题促使气象雷达需采用线极化。在美国NEXRAD天气监视雷达 – 1988多普勒（WSR-88D）S波段雷达部署之初，系统采用的是椭圆极化。这是为了在射频信号的发射与接收中实现高效且具有成本效益的硬件设计。然而，系统管理人员很快发现，强降雨中的去极化会严重影响业务运行，因此雷达被修改为采用水平线极化（Sirmans, 1993）。鉴于极化方式是考量抗干扰能力的一个因素，应保留当前使用线极化（水平及/或垂直）的能力。

4.2.9.3 最大不模糊距离与速度估计

气象雷达频段的选择同时也决定了最大可测风速和最大探测距离的性能特征。在脉冲雷达中，脉冲间隔时间决定了雷达的最大不模糊距离⁶。脉冲的回波必须在下一个脉冲发射前返回接收机，否则接收到的脉冲将产生距离模糊。在多普勒雷达系统中，脉冲重复频率（PRF）决定了雷达可测的最大不模糊距离和速度（Doviak, 1979）。在雷达设计中，设计者受到不模糊距离-速度乘积的限制，该常数由下式给出：

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

式中：

R_m ：雷达不模糊距离（雷达可测量的最大距离）

V_m ：雷达不模糊速度（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

由雷达频率设定的信号波长是雷达设计者手中唯一可调节的参数，用以最大化雷达的最大探测距离和最大速度测量能力。波长的减小要求有效探测距离、有效速度测量能力或两者同时按频率增加的相同幅度进行缩减。为限制模糊并改善距离-速度乘积，现代天气雷达，特别是C波段雷达，常采用结合不同PRF的不同发射方案（见第4.2.4节）。

⁶ 最大不模糊距离是指发射脉冲在下一个脉冲发出之前，能够传播并返回雷达的最远距离。换言之，它是雷达能量在相邻脉冲间隔内往返所能达到的最大距离，且在此距离内测得的信息是可靠的。

文中给出了不同技术的数据：磁控管、TWT，其中行波管能够发射具有更宽发射频谱的短脉冲。部分磁控管在宽环境温度范围内的频移小于1 MHz。脉冲压缩技术可能需要占用更多的频谱资源。

即使在S波段的较长波长下，要在长距离和大速度跨度上实现可接受的雷达性能也可能存在困难。例如，美国NEXRAD计划采用了多种缓解方法，如使用不同PRF在同一仰角进行多次扫描以及系统性相位编码。而在较短波长下，这些问题变得更具挑战性。

4.2.9.4 回波相干性

不模糊速度（奈奎斯特频率）的极限由PRF与波长的关系决定。奈奎斯特共区间（不模糊速度范围）与波长成正比。相关公式如下：

$$V_a = \frac{\lambda \cdot PRF}{4} \quad (4-12)$$

因此，对于给定的PRF，波长确定了奈奎斯特共区间，进而限制了多普勒估计在谱宽方面的精度。当谱宽相对于奈奎斯特共区间变大时，雷达脉冲间的采样将失去相干性，估计精度随之下降。谱宽可能因湍流、风切变和下落速度等多种因素而增大（谱展宽），并占据谱的较大部分（Fabry, 2015, 第5.2节）。如果谱宽超过奈奎斯特共区间的约 $(2\pi)^{-1}$ ，多普勒速度估计的方差将呈指数增长（Doviak, 1978）。

由于湍流和风切变的影响随雷达采样体积增大而增强，谱宽是雷达有效波束宽度和距离的函数。可将“相干距离”定义为能够获得可接受质量多普勒估计的最大距离。对于给定的波束宽度，较长波长（如10 cm，S波段）更为理想。

4.2.9.5 共振效应 – 定量强度测量

球形粒子的有效后向散射截面高度依赖于入射信号波长及球体直径（Rheinstein, 1968）。为了获得准确的反射率估计（即后向散射截面的度量），回波功率必须是滴粒径的线性函数。这就要求雷达后向散射发生在瑞利区，而对于通常预期的雨滴直径，应避免进入非线性极强的米氏区（Fabry, 2015）。除衰减外，共振效应也会对极化变量的估计产生负面影响（Zrníc, 2000）。正如Zrníc所述，在5 cm波长下，滴粒径大于约5 mm时会发生共振，极化变量呈现非线性（非单调）行为，使得精确的定量估计无法实现。共振对相关系数的影响在C波段尤为明显，特别是当反射率值大于30 dBz时（Ryzhkov, 2005）。

在米氏区，滴粒径与后向散射截面之间关系的不确定性，可能导致较短波长无法获得可接受的反射率估计。在存在衰减的波长下，雷达校准常数的微小误差会导致降雨率估计出现巨大偏差（Hitschfeld, 1954）。

4.2.9.6 结论

气象雷达频段的选择与所需的覆盖范围密切相关。如果需要长距离覆盖，或地处强降雨典型的地理区域，S波段能为基于强度的参数及多普勒估计提供更高质量的测量结果。在其他地理区域或较短距离上，C波段和X波段雷达则分别更为适用。其他主要考量包括：由于需要足够高的PRF来处理精确的多普勒估计，导致不模糊距离缩短，从而难以充分缓解距离和速度模糊问题。数据精度的其他影响源于共振效应（米氏散射与瑞利散射），这导致回波功率（后向散射信号）与降水滴粒径分布之间呈现非线性关系。这种情况阻碍了精确的降雨率估计，并严重降低了粒子识别算法的性能。

4.2.10 天气雷达的脆弱性

天气雷达通过测量发射信号从其发射机传输至目标并返回雷达站点所需的时间来确定目标（天气现象）的距离。传输时间是路径长度的函数，其测量精度关键取决于脉冲的上升和下降时间：边沿越陡峭，定时检测越精确。脉冲的前沿或后沿是测量回波脉冲到达时间的标记，该边沿越短，测量的可能精度就越高。

为了保持短的脉冲过渡时间，发射机和接收机硬件需在宽频带内具备相位线性度。雷达带宽大致与两个脉冲过渡时间中较短者成正比，试图通过附加滤波等手段将发射信号带宽降至必要值以下，会降低系统精度。雷达带宽常令不熟悉雷达系统者感到意外，天气雷达的3 dB带宽可达5至10 MHz。在雷达带宽内接收到的干扰同样会降低性能。

还必须重申，大多数无线电通信传输仅涉及在具有已知特性的天线间单次穿越路径，而雷达信号必须两次穿越该路径，并在其间经历非专为此目的设计的物体（雨滴、冰雹、风中碎屑）的反射。由此产生的接收信号极其微弱。

尽管经常使用大功率发射机和高灵敏度接收机，雷达仍极易受到噪声和干扰的影响。

4.2.10.1 可能的干扰类型

天气雷达准确描绘大气现状的能力可能因各种形式的干扰而降低，这些干扰可能限制，或在最坏情况下完全丧失雷达探测不同高度风速和风向、提供相关降雨率与累积量、定位及追踪飓风、台风、龙卷风、大风及其他风暴相关现象的能力。气象探测所需的极高灵敏度使得天气雷达特别易受干扰，这可能严重损害其业务效能。因此，识别可能降低雷达业务能力的干扰类型至关重要。

恒定、时变及脉冲式侵入信号是天气雷达可能遭遇的主要干扰类型。一旦识别出这些干扰形式，便可确定气象雷达系统在预报能力受损前所能承受的最大干扰电平。

气象雷达的保护准则电平可见建议书ITU-R M.1849-1，其中规定恒定干扰的最大 $I/N = -10$ dB。

4.2.10.2 恒定干扰的影响

4.2.10.2.1 地理覆盖范围/

恒定干扰会缩短雷达的业务探测距离，导致相应的覆盖地理区域缩小，原因是噪声相应增加。

保护准则 $I/N = -10$ dB对应于噪声或能量增加0.5 dB。

基于雷达需经校准以使接收机噪声电平（即约-113 dBm）与100 km处0 dBz反射率电平相一致的原则，噪声增加会改变雷达的标称条件，从而缩短其业务探测距离。

当前典型C波段气象雷达的覆盖范围大致可达200 km。表4-3汇总了随干扰和噪声增加而损失的距离与覆盖率。

表4-3
距离与覆盖率损失

噪声增加 (dB)	对应 I/N (dB)	覆盖损失 (km)	覆盖损失 (%, 相对于表面积)
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 降雨率

恒定干扰还会导致雷达接收的能量增加，从而影响与各类降水（如雨、雪、冰雹）相关的反射率测量。表4-4汇总了随着干扰（噪声）增加，若干降水事件的百分比增幅。

根据第4.1.2节的描述，特定反射率电平（dB）对应的降水率由下式给出：

$$z = AR^B \tag{4-13}$$

式中：

- Z： 反射率
- A： 散射常数
- B： 比率乘数

且

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

式中：

dBz: 反射率（dB）。

重新整理各项并求解R，得到以下方程：

$$R_{(mm/h)} = \left(\frac{10^{\left(\frac{dBz}{10}\right)}}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1.6}\right)} \tag{4-14}$$

假设能量恒定增加C，则所得降雨率为：

$$R_{(mm/h)} = \left(\frac{10^{\left(\frac{dBz+C}{10}\right)}}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1.6}\right)} \tag{4-15}$$

降雨率的百分比增幅则为一个由下式给出的常数：

$$p(R_{(mm/h)}) = 100 \times \left(10^{\left(\frac{C}{16}\right)} - 1 \right) \tag{4-16}$$

表4-4列出了若干降水类型的典型散射常数和比率乘数⁷。

表4-4

各类降水事件的散射常数与比率乘数

变量	层状雨	对流雨	雪	冰雹
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汇总了若干降水事件的降雨率百分比增幅。

表4-5

降水率增幅

噪声增加 （dB）	对应I/N （dB）	层状雨率增幅 （%）	对流雨率增幅 （%）	雪率增幅 （%）	冰雹率增幅 （%）
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

上述计算表明，无论降雨量值和降水类型如何，给定恒定能量增加所对应的高估百分比也是一个常数，因此不可忽略。

此外，考虑到针对给定距离库的反射率计算是基于所有估计值的均值（dBz）及其相关标准差，值得注意的是，干扰的增加不会改变雷达探测降雨单元的能力（即原本未被判定为降雨单元的仍不会被判定为降雨单元），而仅会影响降雨率。

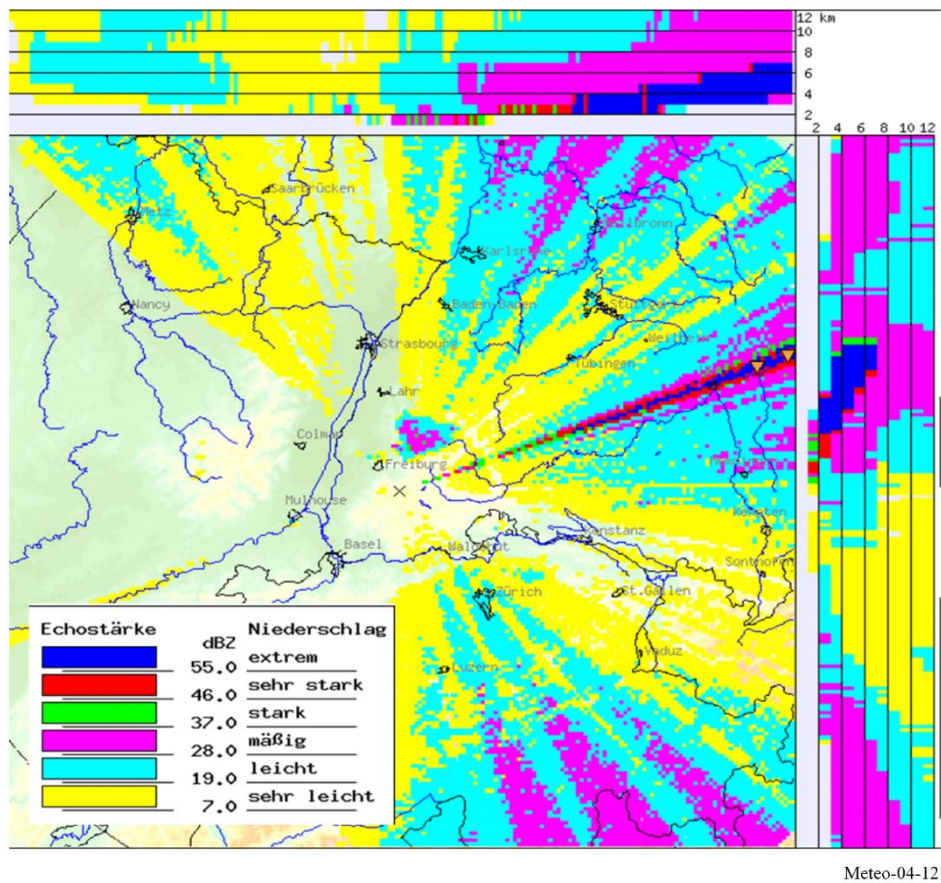
同样值得关注的是，无论是覆盖损失还是降雨率高估，当前商定的-10 dB I/N保护准则所代表的雷达性能劣化幅度在7%至11%之间，这与普遍认可的所有无线电通信业务的性能劣化百分比相当。

⁷ 层状雨、对流雨、雪和冰雹的散射常数及降水率系数均由实测数据推导得出。

恒定干扰对雷达降水模式影响的示例如图4-12所示。需着重指出，尽管是恒定干扰，但其影响的变化源于天线的旋转，最大干扰（图中绿色部分）出现在干扰源的方位角上。

图4-12

天气雷达降水模式受干扰示例



4.2.10.2.3 风测量

在多普勒测量情形下，给定的恒定干扰主要通过期望信号的相位失真，以不同方式影响风速估计。其影响关键取决于干扰信号的相位如何改变用于多普勒处理的复合信号相位。

后一种假设显然不易确定，且将取决于信号和/或环境因素。然而，建议在理论上考量不同情形：

- 情形1 – 若雷达检测到的干扰信号相位是随机的，则意味着合成矢量在统计上为零，无论其电平高低。因此，理论上其对风测量不会产生任何影响。
- 情形2 – 反之，若检测到的相位非随机且近乎恒定，则将产生一个具有特定模值的恒定矢量，其对风测量的影响将取决于该矢量的相位和模值。然而，即便对于恒定干扰电平，确定此种影响可能亦非易事，故此处不予论述。

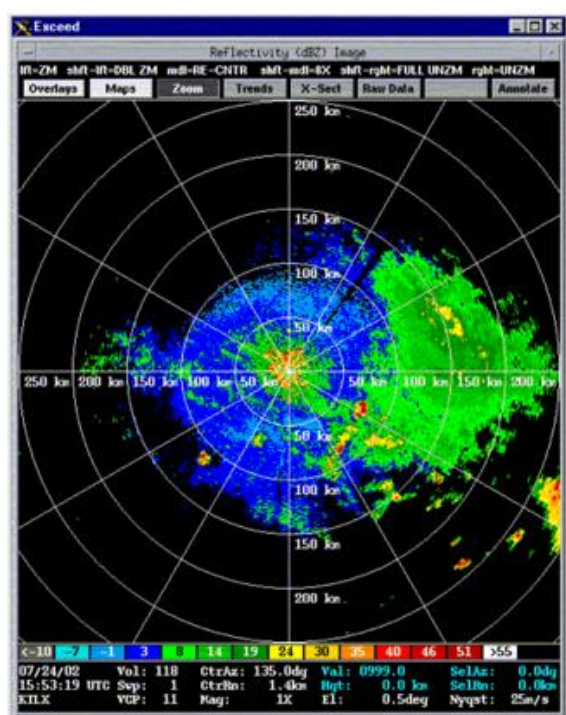
此外，还可假设：当干扰电平远低于有用信号时，后者的相位不会发生改变；反之，若干扰信号远高于有用信号，则雷达检测到的相位将是干扰信号的相位。在后一情形下，前述情形1与情形2的讨论依然适用。在这两种情形之间，即当干扰信号与有用信号的电平相当时，判断何种信号将主导相位检测似乎颇为困难。

4.2.10.3 持续性脉冲干扰的影响

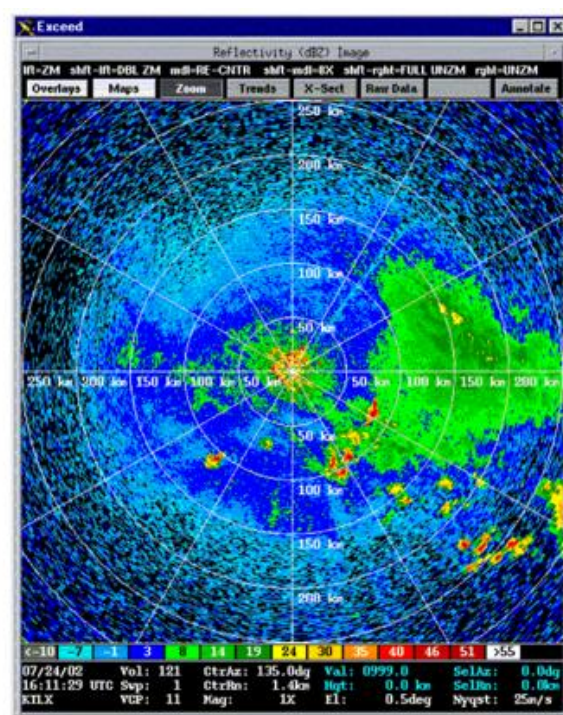
脉冲干扰会对反射率数据产生显著影响，可能导致返回的无法可靠呈现大气中目标图像的数据。其实例如图4-13所示。

图4-13

天气雷达降水模式无干扰与受干扰情况对比



无干扰



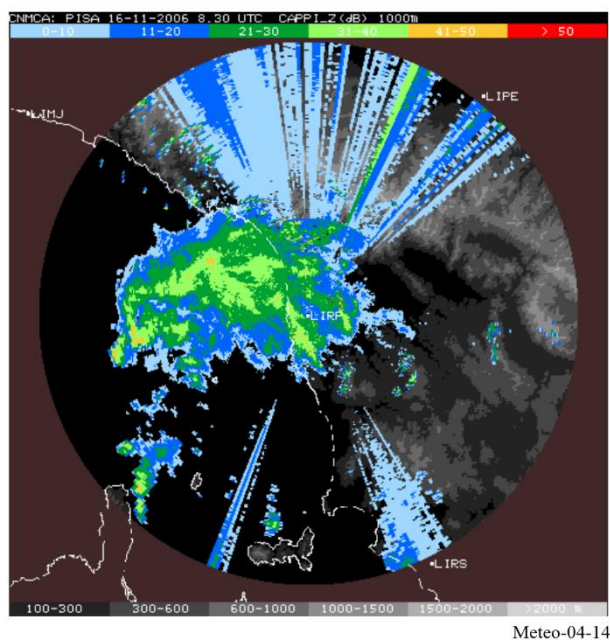
受干扰

Meteo-04-13

图4-14展示了单个室内低功率发射机对气象雷达造成干扰的另一示例。此类干扰在雷达输出产品中表现为笔形波束状伪影。在雷达工作带宽内及附近持续接收到幅度恒定的干扰信号会产生这些伪影。其视觉强度取决于干扰源与雷达站之间的距离，以及雷达基于接收干扰强度应用的距离校正因子。（详见第4.2.10.5节。）

图4-14

气象雷达受干扰（降水模式）



4.2.10.4 气象雷达与其他雷达系统间的干扰及共存

气象雷达通常通过确保干扰噪声比 (I/N) 为-10 dB, 以防止其他业务系统的恒定干扰。

然而, 两部气象雷达之间, 或气象雷达与非气象雷达之间的共存条件可能较宽松, 具体需基于个案分析。这是因为两部脉冲雷达系统间的干扰动态特性, 与雷达频率同其他业务系统共享有着本质区别。以下因素列举了这些差异的若干实例:

- **干扰的非同步性:** 一部雷达的扫描策略不与另一部雷达的运行同步, 从而最小化了持续中断的可能性。
- **低占空比:** 雷达系统通常以0.05-0.2%范围内的间歇方式发射信号, 这降低了持续干扰的可能性。
- **主波束耦合概率低:** 两部雷达的主波束相互干扰的概率较低, 尤其在系统正确对准和间隔布置时。
- **完善的信号处理能力:** 现代雷达系统配备先进的干扰抑制 (IR) 电路和信号处理功能, 使其能够滤除无用信号。
- **干扰抑制技术:** 诸如跳频或使用窄带滤波器等技术有助于抑制雷达间的干扰。

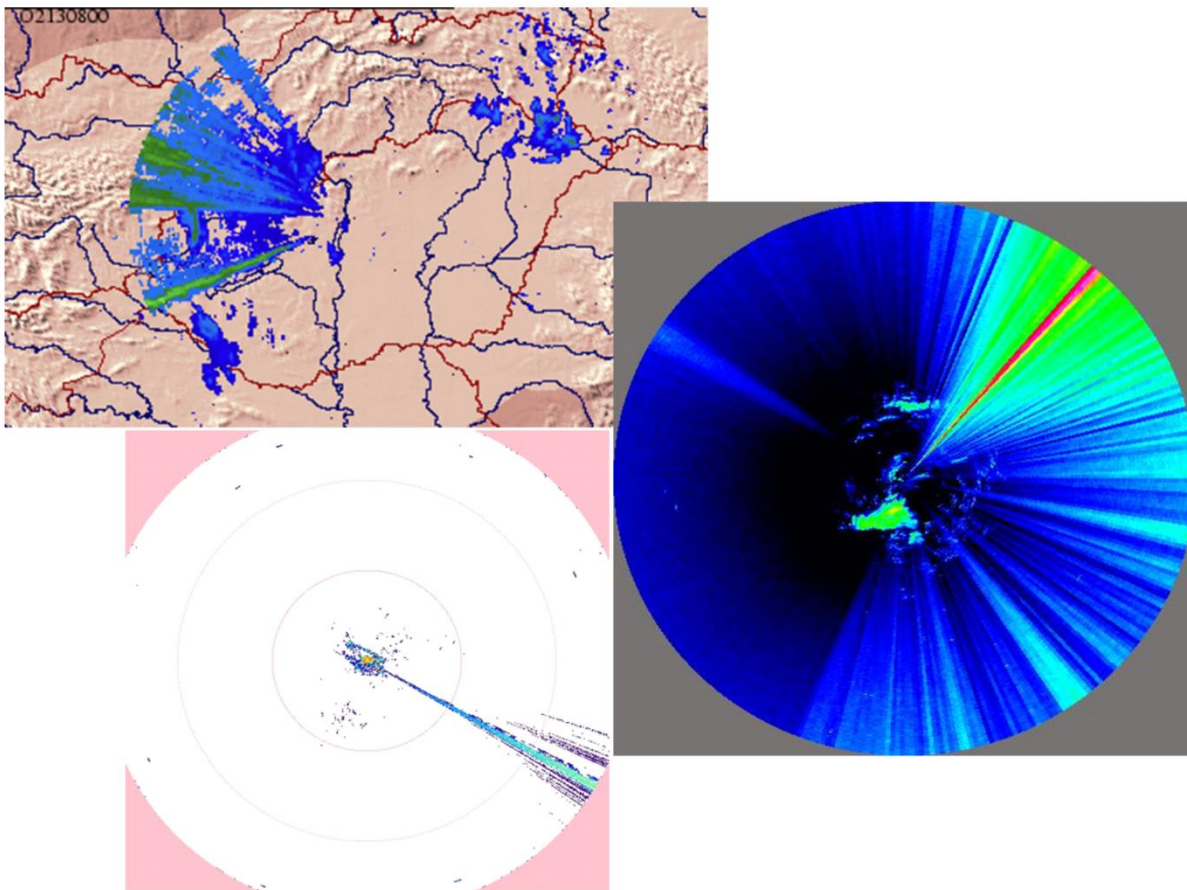
4.2.10.5 C波段雷达受WAS/RLAN干扰

WRC-03决定在5 150-5 350 MHz和5 470-5 725 MHz频段内授权WAS/RLAN (如WiFi) 使用。WRC-03的决定附带了要求WAS/RLAN实施动态频率选择 (DFS) 以探测并规避雷达频率的条件。

遗憾的是, 对天气雷达的干扰很早就开始出现, 2006年始于欧洲, 主要在东部国家, 现已在全球大部分部署了5.6 GHz频段C波段雷达的国家出现。

图4-15

WAS/RLAN对天气雷达干扰示例



Meteo-04-15

人们很快发现，DFS规范未能充分应对天气雷达的特性：

- 基于重复策略的体积扫描（通常为10至15分钟）。
- 工作仰角范围为0°至90°。
- 脉冲宽度范围为0.5至2.5 μs （针对业务雷达）。
- 脉冲重复频率（PRF）范围为250至1 200 Hz（针对业务雷达）。
- 固定、交错、交织的PRF。
- 转速范围为1至6转/分（rpm）。
- 噪声校准。

在欧洲，随即修订了WAS/RLAN的ETSI标准EN 301 893，纳入了新的DFS规范以解决这些特性问题。

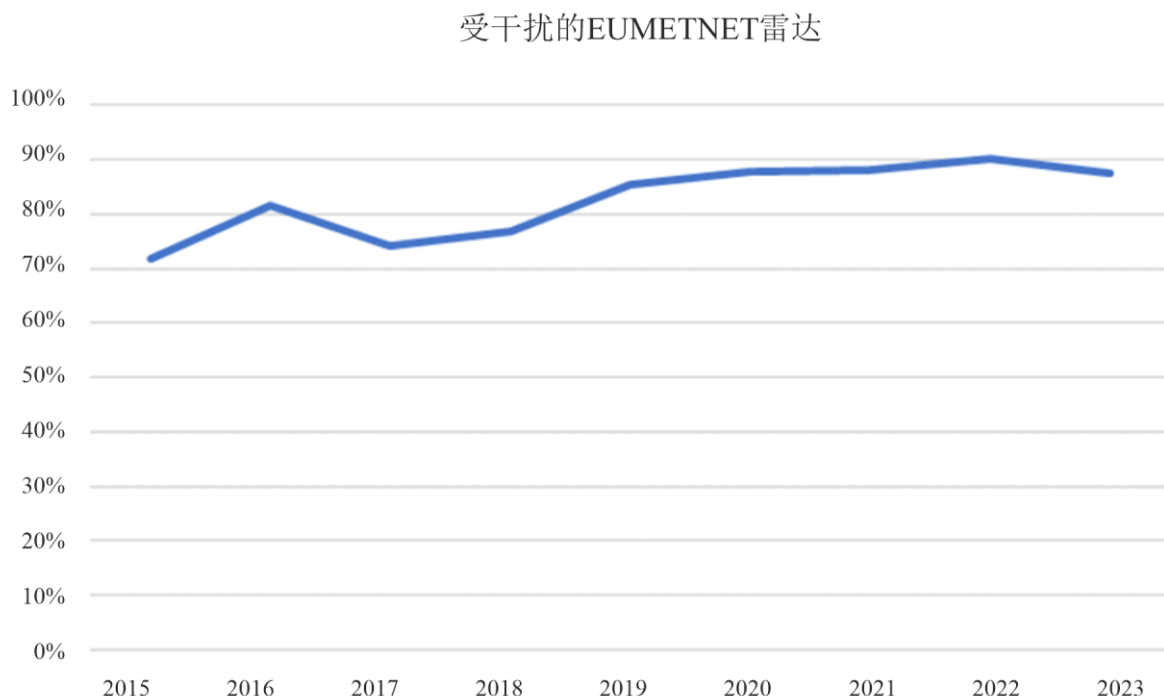
然而，数年之后，干扰案例开始急剧增加。进一步调查显示，这过去是并且现在仍然归因于不符合规范的WAS/RLAN设备：

- 内部无DFS
- DFS被关闭
- DFS规范未得到全面落实

自此，气象界，特别是欧洲的气象界（通过EUMETNET），持续与监管机构交涉以寻求根本性解决方案。尽管通过了报告、行动计划或“可能有助于缓解问题的选项清单”，多年来情况并未改变。图4-16描绘了欧洲受干扰天气雷达的百分比，每年接近90%。

图4-16

受干扰的EUMETNET天气雷达百分比



Meteo-04-16

此外，欧洲最新的市场监督显示，欧洲市场上三分之二的RLAN设备不符合规范。自2015年以来，EUMETNET开展的年度问卷调查显示情况未有改善。

该局面日益被视为对C波段雷达业务的重大威胁。已考虑多种缓解措施，其中包括：

- 禁止WAS/RLAN设备在5 600-5 650 MHz频段内使用。
- 禁止固定室外RLAN在5 600-5 650 MHz频段内使用。
- 加强市场监督。
- 强调5 350-5 470 MHz频段（无RLAN）作为5.6 GHz的替代方案。

尽管这些措施已在欧洲的报告（如JRC报告）中列出，但监管机构大多未采取任何后续行动，甚至予以否决。

现阶段，仅有5 365-5 470 MHz替代频段被气象界视为缓解WAS/RLAN干扰的可行方案，但这需由气象界自行承担费用与努力。然而，在采取任何行动之前，必须通过必要的测量确保该频段无干扰。

4.2.10.6 5.4GHz频段用于C波段雷达

5 350-5 470 MHz频段已在部分国家作为天气雷达的标称频段使用（如瑞士、中国）。

在考虑更广泛使用该频段前，已开展技术分析，以验证在该频段部署气象雷达与地球探测卫星业务（EESS）（有源）传感器之间的兼容性。该分析促成了ECC报告346的采纳，报告指出“在5 365-5 470 MHz频段内，天气雷达与EESS（有源）的兼容性可以得到保障，且无需对天气雷达施加特定的运行条件”，此结论适用于相当大规模的天气雷达部署（约占现有雷达的三分之一）。

需强调的是，部分欧洲国家无线电主管部门对此持反对态度。我们充分尊重这一立场，但这也使得其气象部门目前别无选择。

还需指出的是，使用5.4 GHz频段可能会带来额外的限制，特别是针对航空无线电导航业务下的系统（机载气象雷达），以及无线电定位业务下的其他雷达部署。

此外，地基天气雷达将失去脚注RR No. **5.450B**在5 600-5 650 MHz频段赋予的监管地位，转而成为次要地位（见脚注RR No. **5.448D**）。

最后，另一个重要问题涉及近期两个东欧国家提出的关于WAS/RLAN在5.4 GHz频段使用的情况，尽管该使用并未获授权。这需要进行进一步核实，以确认这是否会成为多数国家未来的状况，因为这显然可能危及5 365-5 470 MHz频段的潜在使用，而该频段是目前解决5.6 GHz当前干扰局势唯一真正且长期的方案。

4.2.10.7 来自风力发电场的干扰

近年来，单机容量越来越大的风力发电机组不断建成，典型发电设施（或称风力发电场，含多台风机）的数量急剧增加。风力发电机组及风电场，即使在相当远的距离外，也极有可能在大面积范围内降低气象数据质量，并对临近预报和天气预报产生不可忽视的影响。

为进行精确天气预报，天气雷达的设计旨在观测相对狭窄的高度带。由于雷达具有高灵敏度，若风力发电机组部署在天气雷达设施的无线电视距范围内，则会阻断雷达信号的向前传播，产生反射率杂波回波，并引发由尾流湍流诱发的雷达回波。这些干扰机制可能导致对降水累积量的虚假雷达估计、虚假龙卷及中气旋特征、雷暴特征的误判以及风暴单体的错误识别。此外，干扰机制还会降低雷达性能，对预报和预警业务产生负面影响。性能劣化主要通过三种机制发生：遮蔽、杂波及后向散射。

4.2.10.7.1 遮蔽

位于雷达与目标之间的任何地形特征或构筑物均会产生阴影或遮蔽效应。根据其尺寸大小，风力发电机组可能产生遮蔽效应。此类效应的变化取决于涡轮机尺寸、发射雷达类型以及涡轮机相对于雷达的方位（高度、叶片角度、转速以及与雷达的相对位置）。

4.2.10.7.2 杂波

雷达可从任何具有雷达反射特性的表面接收回波。在某些地理区域或特定气象条件下，雷达性能可能受到不需要的回波（即雷达杂波）的不利影响，这些杂波可能掩盖目标回波。对于天气预报员而言，位于天气雷达附近的风力发电机组会带来业务运行问题。

地物杂波信号表现出高反射率、近零多普勒频移、小谱宽，且具有稳定的局地性。与常见的地物杂波（GC）相比，风力发电机组引起的干扰是一个更为棘手的难题。雷达将直接接收到来自塔架（静止）和叶片（非静止）的反射信号。与GC类似，风力发电机杂波（WTC）信号仍应具有相当大的反射率，并可能因叶片旋转导致雷达截面积发生系统性变化而产生调制。

多普勒频移受多种因素影响，包括叶片转速以及转子相对于雷达波束的朝向。当转子朝向与雷达视线方向呈90度时，多普勒速度应达到最大值；当转子背向或面向雷达时，多普勒速度接近于零。由于雷达的分辨体积很可能涵盖整个风力发电机结构，预计谱宽将显著增大，这是由叶片远离和朝向雷达旋转所致。若一个分辨体积内存在多台机组，将进一步加剧此效应。

4.2.10.7.3 来自湍流涡旋的后向散射能量

除了风力发电机组本身反射引起的WTC信号外，还可能观测到来自风电场尾流中湍流涡旋的后向散射能量。预计此类回波将表现出与晴空条件下雷达布拉格尺度折射率不连续性引起的后向散射相似的特征。这些尾流回波随风流漂移，其反射率可能远低于机组的直接反射。然而，它们可能显著扩大受WTC影响的雷达覆盖范围，从而加剧问题。

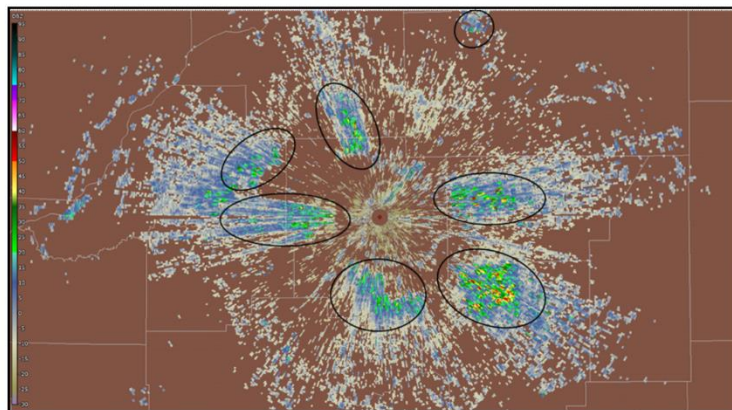
4.2.10.7.4 风力发电机杂波示例

图4-17提供了两个风力⁸发电场干扰的典型示例。正如预期，反射率在近45 dBz处显示高值，且谱宽偶尔超过10 m/s。雷达西南方向相对较小的高反射率区域清晰可见，并与距离天气雷达站约45公里处的风力发电场位置吻合。

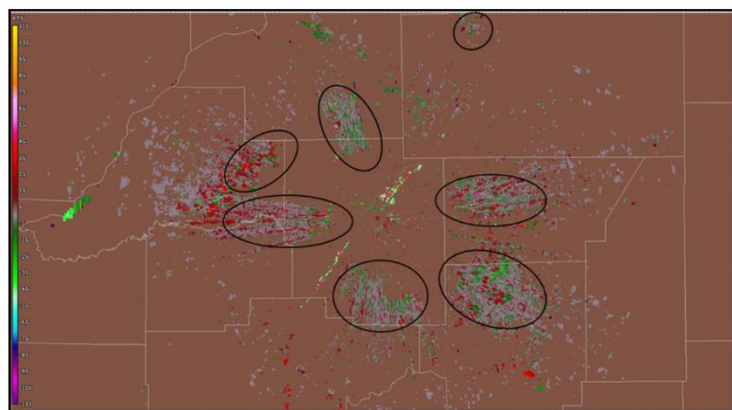
⁸ 风电场是由多台风力发电机组成的集群，用于发电。

图4-17

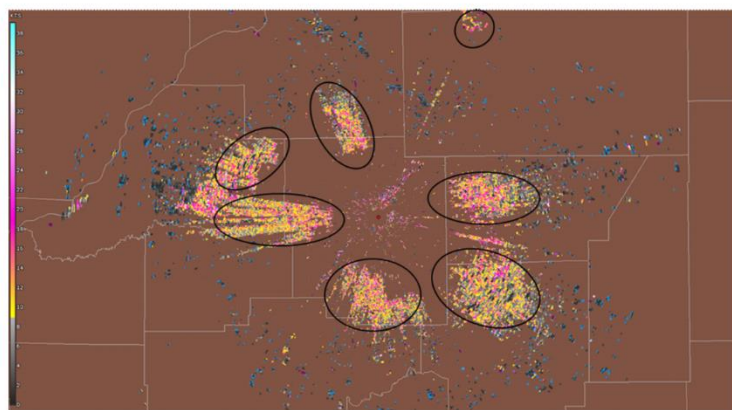
晴空条件下风力发电场对天气雷达干扰示例（圈出部分）



反射率 (dBZ)



径向速度 (kts)



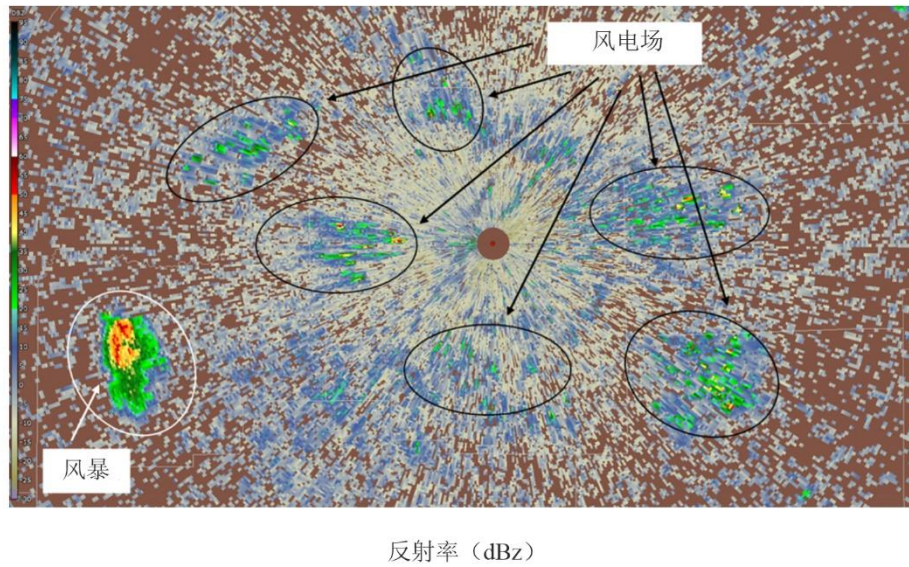
谱宽 (kts)

Meteo-04-17

图4-18展示了同一风力发电场在雷暴事件发生期间的情况。

图4-18

孤立雷暴事件中风力发电场干扰及其对反射率影响的示例

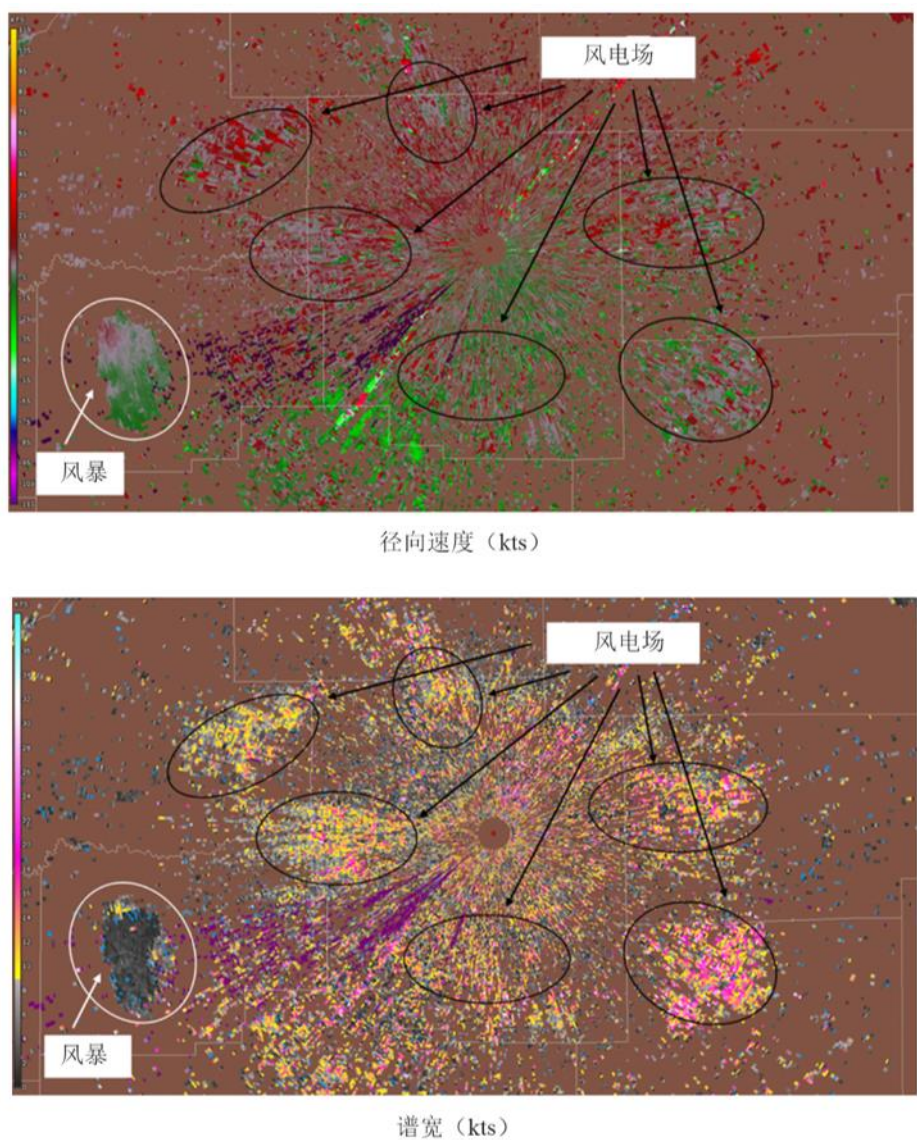


Meteo-04-18

若无先验知识，将极难区分WTC与雷暴。由于叶片朝向和背离雷达旋转，预计平均多普勒速度将接近零。当然，较大的谱宽会降低多普勒速度估计的精度，如图4-19中偏离零值的微小偏差所示。

图4-19

雷暴事件中多普勒速度数据估计示例



Meteo-04-19

4.2.10.7.5 WTC对气象雷达业务运行及预报精度的影响

实地研究阐明了WTC对天气雷达的影响。这些研究表明，风力发电场可对气象雷达产生显著影响，从而降低探测强天气事件的精度。

分析明确显示，与风力发电机组的方向相比，其产生的杂波将存在于一个宽广的扇区（数十度），即使在相当远的距离也是如此。因此，风力发电机组对天气雷达反射率业务运行的影响不可忽略。

特别是，分析表明，单台风力发电机组对天气雷达多普勒模式的影响在数十公里距离外仍极为显著。还需强调的是，在低于10公里的距离内，所有方位角的雷达数据均将出错，即使处于风力发电场所处扇区的180度反向方位亦然。

为保护气象雷达免受风力发电场的有害干扰，将需要某种形式的WTC抑制措施。在就缓解WTC的处理方法得出最终结论前，应开展更多关于WTC的研究，以充分了解WTC对气象雷达的影响范围和程度。一旦明确此点，鉴于风力发电系统的预期增长，可能需要开发缓解WTC的方法。

在关于缓解WTC对气象雷达干扰的持续研究取得结果之前，避免或限制风力发电场影响的当前解决方案是确保两系统间的隔离距离。例如，部分欧洲国家目前正在考虑以下建议：

- 1) 风力发电机组与雷达天线的距离不应低于：
 - C波段雷达：5公里
 - S波段雷达：10公里
- 2) 当风力发电场项目涉及以下距离范围时，应提交影响研究报告：
 - C波段雷达：20公里
 - S波段雷达：30公里

风力发电机组结构尺寸的持续增长导致了影响区域的扩大，其范围远超先前基于较小机组尺寸所提议的限值。例如在澳大利亚，已有若干实例显示，在距雷达站60多公里的平坦区域运行的海上风力发电场，对C波段雷达的三至四次扫描造成了影响。随着机组尺寸和高度的增加，尤其是在风力发电场海拔高于雷达本身的场景下，这种影响显著延伸。在此类情景下，使用S波段雷达时，影响区域可延伸至100公里以外。

尤其是，与陆上项目相比，海上风力发电场正采用尺寸大得多的机组结构。叶尖高度达350至400米已成为海上机组的标配。鉴于海上场址缺乏有助于缓解雷达干扰的自然地形特征（如丘陵或山脉），海上风力发电场对天气雷达 – 特别是位于沿海地区的雷达 – 的影响可能十分显著。这些大型机组结构对天气监测系统构成了巨大挑战，可能导致严重的雷达杂波，甚至在特定区域造成雷达数据的完全丢失，进而影响天气预报与监测的有效性。

4.2.11 与天气雷达共享频谱系统的脆弱性

如上所述，天气雷达的发射功率和天线增益通常相当高，以补偿较长的传输路径损耗（典型峰值等效全向辐射功率约为100 dBW）。这些特性往往会扩大雷达对其同频系统产生干扰的范围（同时需考虑雷达信道宽度）。亦有案例表明，曾长期共存的雷达与固定微波链路，在微波系统由模拟设备升级为更易受脉冲干扰的数字设备后，变得不再兼容。

4.2.12 未来趋势

4.2.12.1 硬件与算法改进

各主管部门正对其气象雷达系统进行重大硬件升级。当前的升级内容包括部署极化雷达，即在当前使用的水平雷达波基础上增加垂直极化。截至2016年，美国所有NEXRAD雷达已完成双偏振升级；截至2024年，欧洲几乎所有OPERA雷达也已升级为双偏振。在澳大利亚，截至2024年，近半数业务雷达已完成双偏振升级。

旨在进一步提升气象雷达性能的其他技术也在推进中。其中首要的是各类解决距离/速度模糊、提高数据采集速度、减少伪影影响、降低杂波以及高效处理信号以提供尽可能精确的气象估计的算法。其他工作还包括联合使用天气雷达和风廓线雷达。另有少量投入用于雷电及其危害研究，以确定雷电的起始与终止是否可被预测。

半导体技术的进步（主要是GaN晶体管）也使得雷达发射机可采用固态功率放大器，取代传统使用的真空管（磁控管、速调管或TWT）。尽管峰值功率较低，但固态放大器可用的长脉冲宽度和高占空比能够保持与传统管式发射机相当的脉冲能量，从而实现相似的测量灵敏度。

研究人员已将相控阵雷达技术应用于天气监视领域。相控阵技术有望以电子扫描阵列天线取代机械扫描的抛物面盘式天线。这一变革将支持更灵活的扫描策略，并能更快速地更新变化的天气状况。相控阵雷达系统的早期测试前景可期。相控阵技术将加深对风暴演变的基本认知，进而改进计算机模型、提升预报精度并提前预警。此外，该技术有望将龙卷风预警的平均提前时间大幅延长，远超当前平均13分钟的水平。通过改进接收机和信号处理子系统，可以更具经济效益地实现系统增强。相控阵升级（若实施）可能不会复用现有发射机，而是由相控阵中的分布式收发模块取而代之。部分地区已就相控阵气象雷达的可能部署展开讨论。

4.2.12.2 固态技术

部分采用固态发射机（SSTX）的天气雷达已列入建议书ITU-R M.1849-3，其在5 250-5 850 MHz 频段的应用已有数年。

SSTX天气雷达的特性

固态（SSTX）天气雷达的发射峰值功率介于4至8 kW之间，低于基于真空管的雷达（S波段和C波段可达数百kW）；较低的峰值功率导致SSTX雷达的灵敏度下降。为补偿此影响并保持距离分辨率，需采用脉冲压缩技术以延长脉冲宽度。脉冲压缩所用的脉冲宽度可达200 μs（而真空管系统仅为0.5至3.5 μs），以补偿平均功率。在非压缩脉冲调制雷达中，距离分辨率取决于脉冲持续时间。脉冲压缩技术使得在使用更长脉冲和更低峰值功率发射机的同时，不影响距离分辨率。这是通过采用合适的频率或相位调制技术实现的。

脉冲压缩比（PCR）可定义为未压缩发射脉冲宽度与压缩后脉冲宽度之比，并按发射脉冲宽度与3 dB带宽的乘积计算。通过脉冲压缩，一个具有相对较低峰值功率的较长发射脉冲，可达到基本雷达方程所预测的同等灵敏度和距离分辨率。

$$SNR = \frac{\pi^3 |K|^2}{2^{10} \ln(2) c} \cdot \frac{f^2}{r^2} \cdot \underbrace{G^2 \theta^2}_{Antenna} \cdot \underbrace{\tau P}_{Transmit\ pulse\ energy} \cdot \underbrace{\frac{1}{k_B T N_F B}}_{Receiver\ noise} \cdot Z \tag{4-17}$$

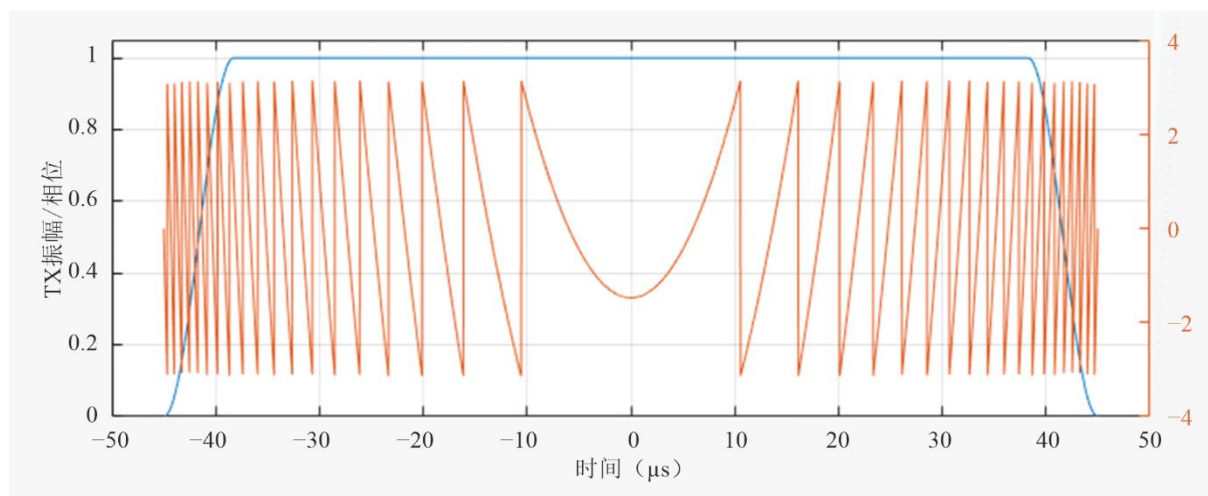
c:	光速	G:	天线增益	N _F :	噪声系数
K ² :	0.93（雨）、0.2（冰）	θ:	天线波束宽度	T:	温度
k _B :	玻尔兹曼常数	τ:	脉冲宽度	r:	距离
SNR:	信噪比	P:	峰值功率	Z:	反射率
f:	频率	B:	3 dB带宽		

脉冲压缩允许独立调整距离分辨率和距离灵敏度。距离分辨率与调制发射机信号带宽B成反比设定。距离灵敏度则与脉冲能量τP成正比，与带宽B成反比。这归功于脉冲压缩能够检测压缩前淹没于噪声中的回波信号。

脉冲压缩的实现涉及复杂的信号处理技术。这种复杂性需要精密的硬件和软件支持。脉冲压缩方法可采用多种调制方式，包括线性调频（LFM）或非线性调频（NLFM）、时变编码调频（如Costas码）或相位调制（PM）。通常，NLFM被应用于天气雷达。图4-20展示了一个脉冲宽度约为80 μs的发射脉冲示例。

图4-20

标称发射幅度（蓝色）与相位（橙色）的时间历程



Meteo-04-20

在发射长脉冲期间，雷达接收机无法同时接收数据。这是由于发射机功率极高，且发射机与接收机之间的隔离度有限。此外，天线会反射功率回灌至接收机。为保护接收机前端免受高功率损坏，收发限幅器（TR-limiter）会阻断入射的发射机信号。这导致在长脉冲发射期间接收机被阻塞，形成所谓的盲区。因此，需要使用短脉冲（约 $1\ \mu\text{s}$ ）来覆盖该盲区。由此可见，SSTX天气雷达仍需发射短脉冲。

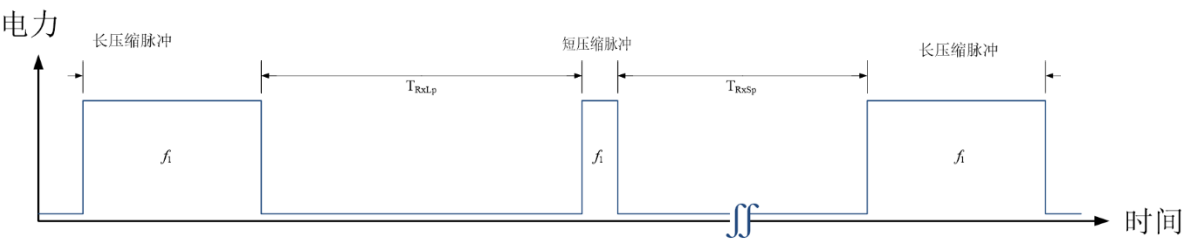
SSTX需要覆盖盲区和远距离，以全面掌握降水状况。有三种方法可满足此要求。

方法1：同频双脉冲发射

如图4-21所示，长脉冲与短脉冲之间设有间隔依次发射。两个脉冲频率相同，此处为 f_1 。所占频谱局限于单一“载波”。时间 TRxLp 用于采样来自压缩脉冲的目标距离回波。缺点是完成一次完整体积扫描所需时间更长。

图4-21

单频双脉冲发射



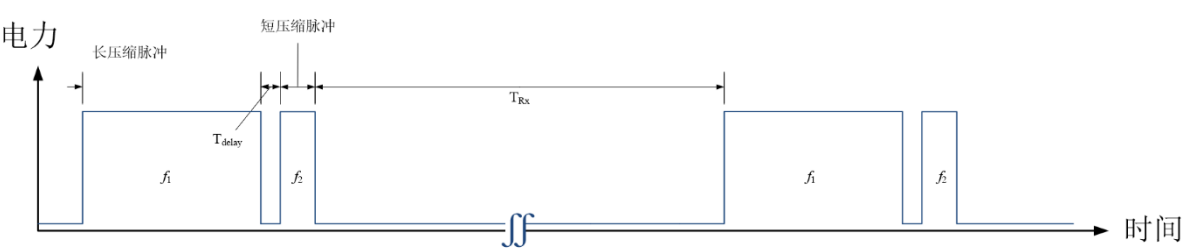
Meteo-04-21

方法2：双频双脉冲发射

如图4-22所示，长脉冲与短脉冲之间间隔极短或无间隔发射。两个脉冲频率不同，此处为 f_1 和 f_2 。与方法1相比，其优点是可缩短完成一次完整体积扫描的时间。

图4-22

双频双脉冲发射：A型

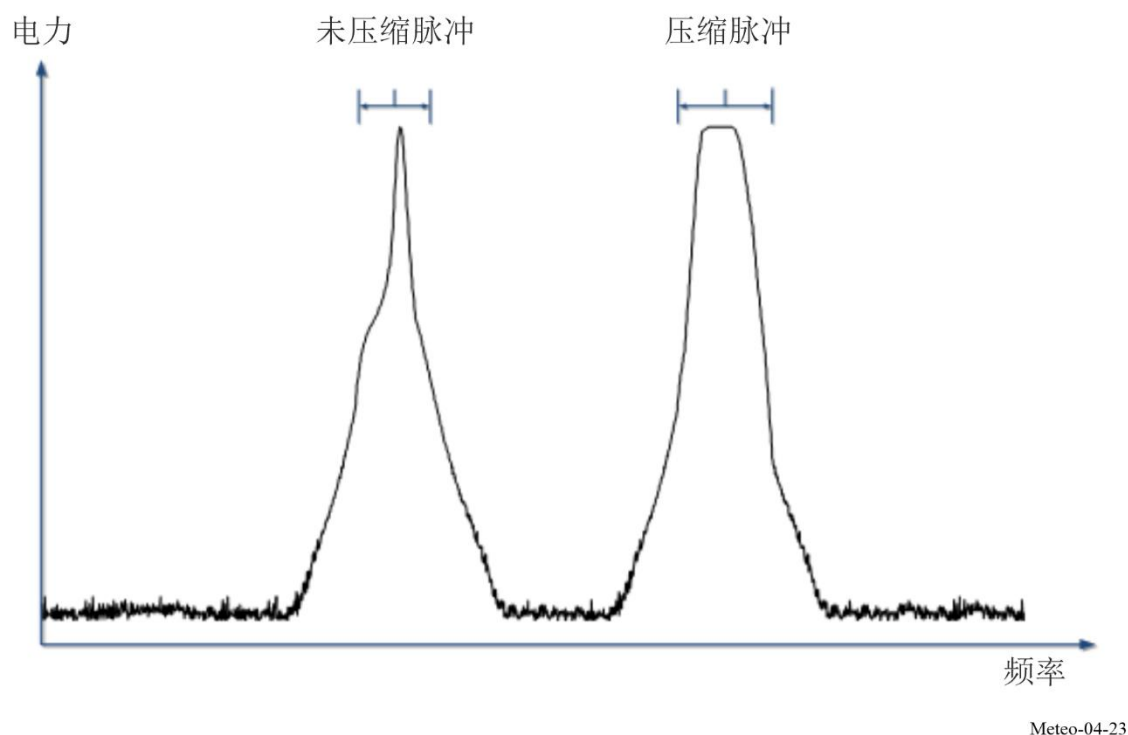


Meteo-04-22

其缺点是需要更宽的频谱。频率间隔估计在3至6 MHz之间。所占频谱示例如图4-23所示。

图4-23

双频脉冲压缩频谱示例：A型



由于使用双频（长、短脉冲各一）可更快完成体积扫描，预计这将是业务运行的首选方案。

方法3：长脉冲发射

仅使用长脉冲即可探测盲区目标，无需发射任何短脉冲。

SSTX天气雷达部署

SSTX天气雷达已在部分国家部署，全球范围内运行此类系统的兴趣日益增长。然而，鉴于现有真空管天气雷达数量庞大（超过1 500部）及其长达20年的运行生命周期，即使SSTX在未来部署量增加，两种技术仍将在漫长的过渡期内并存运行。

需注意的是，在5 GHz频段与无线局域网（RLAN）设备的共用中已识别出风险。现有真空管天气雷达已遭受RLAN系统的严重干扰，尽管引入了动态频率选择（DFS）机制以确保雷达与RLAN设备在无干扰雷达业务的前提下共享5 GHz频段。与真空管发射机相比，SSTX功率低得多，导致其在RLAN设备中的检测性能较差，且SSTX系统的检测距离可能缩短。此外，由于SSTX发射的脉冲参数不同于RLAN设备中存储的雷达测试信号，RLAN设备的行为表现尚存不确定性。此问题对采用SSTX技术的天气雷达至关重要。该议题已在ITU-R提出，相关研究正在进行中，旨在确保未来SSTX天气雷达免受RLAN干扰。

这些未来趋势需持续跟踪，且随着技术发展，将对未来的干扰缓解策略和保护准则制定产生影响。

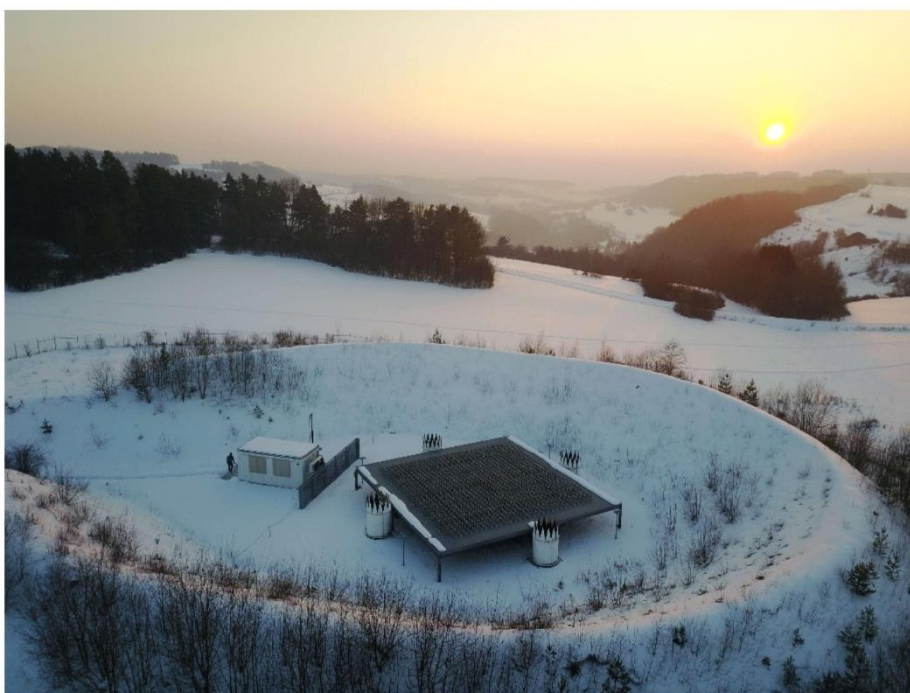
4.3 风廓线雷达（WPR）

风廓线雷达用于获取风的垂直剖面，其原理是探测在所有天气条件下（包括晴空和阴云大气），大气中后向散射的极其微小的发射功率份额。需着重指出，目前尚无其他测风遥感系统具备此种全天候能力，这归因于波长范围涵盖VHF至L波段的较长电磁波的传播特性。

图4-24为一典型固定式风廓线雷达安装现场照片。

图4-24

德国拜罗伊特附近一座482 MHz风廓线雷达安装现场照片



Meteo-04-24

风廓线雷达相较于其他测风系统的一大主要优势，在于其能够连续监测仪器站点上方水平风场的垂直剖面。此外，它们还可用于探测降水、观测垂直速度场中的重要特征（重力波和对流上升气流）、评估湍流强度以及测量大气稳定度。通过加装无线电声探测系统（RASS）⁹，它们还能提供大气虚温垂直剖面的详细信息。

4.3.1 用户需求

风廓线雷达主要用于以全天24小时模式、高时间分辨率测量仪器站点处的风垂直剖面。这些数据对于数值天气预报以及卫星（如欧空局Aeolus星载ALADIN多普勒激光雷达）的校准/验证至关重要。业务运行环境中的主要用户需求是高精度、足够的垂直分辨率（与数值天气预报模型的典型垂直分辨率相匹配）以及良好的高度覆盖。

⁹ RASS采用频率匹配的声源，使声波波长与雷达发射电磁波的波长之半相匹配（布拉格条件）。RASS测量依赖于温度的声速，从而提供大气虚温的遥感测量。

估计风的精度，除其他因素外，取决于无污染射频频谱的可用性。由于这些雷达对探测光学晴空大气中微弱的回波极为敏感，任何带内干扰都极易造成损害。虽然复杂的信号处理有时能减轻此类影响，但基于软件的射频干扰缓解措施往往会导致高度覆盖的缩减，因为雷达的灵敏度不可避免地会降低。

可实现的海拔高度覆盖取决于仍能正确分析的最弱后向散射波强度。因此，接收信号需具备最小的信噪比（SNR）。SNR取决于若干因素，这些因素包含在所谓的雷达方程中。考察用户需求对风廓线雷达运行参数和设计影响的一个有效途径，是考虑以下基于[Gossard和Strauch, 1983, 其方程12-3]的简化晴空散射雷达方程：

$$SNR = \text{const} \frac{\bar{P}_t A_e \Delta z \lambda^{1/6} t_{obs}^{1/2} C_n^2}{T_{sys} z^2} \quad (4-18)$$

式中：

$\bar{P}_t$ ：平均发射功率（W）

A_e ：有效孔径（m²）

Δz ：高度分辨率（m）

z ：高度（m）

λ ：波长（m）

t_{obs} ：观测（平均）时间（s）

T_{sys} ：系统噪声温度（K）

C_n^2 ：折射率结构参数（m^{-2/3}）。

晴空散射产生的信号其SNR通常低于降水粒子散射的信号，因而是一种更具挑战性的工况，因为可靠的全天候运行要求在大气中存在弱散射条件时也能具备足够的SNR。典型工况包括（冬季）低湿度时段以及低湍流情况，例如10-15 km高度急流核心区。

方程(4-18)仅在雷达半波长（即所谓布拉格波长）位于大气湍流惯性子区范围内时成立，亦即满足 $l_0 \leq \lambda/2 \leq L_0$ ，其中 l_0 表示内尺度（该惯性子区的下限）， L_0 表示湍流外尺度。

事实上，大气湍流的结构在物理上将可用风廓线雷达的波长范围限制在约10-0.2 m（30至1 500 MHz）。尺度小于 l_0 的折射率场湍流结构会因黏性作用迅速耗散为热能，从而导致散射过程的黏性截断。因此，由于缺乏尺度为 $\lambda/2$ 的折射率起伏，较短波长无法用于晴空风廓线探测。

此外，在受惯性子区界限约束的相关布拉格波长范围内，折射率结构参数虽与频率无关，但其随高度变化强烈，且可在数个量级上波动。

其余的频率依赖性主要包含在波长因子中，仅系统噪声温度在波长大于约1 m时包含了显著的宇宙噪声贡献。

根据方程(4-18)，SNR可通过以下方式显著提升：

- 采用大孔径天线；
- 提高峰值功率与脉冲重复频率（PRF）以增加平均功率；
- 应用脉冲压缩技术；
- 长波长；

- 提高接收机灵敏度并降低接收机噪声电平；
- 采用较粗的高度分辨率（较长脉冲）；
- 延长平均时间。

然而，此类措施始终会对雷达的其他性能参数及仪器成本产生影响。需特别注意，提高PRF仅在不引发距离模糊问题（二次回波）的前提下可行。由于距离分辨率由脉冲宽度决定，因此在距离分辨率与高度覆盖之间存在直接的权衡取舍。为此，风廓线雷达常以两种模式运行：低模式，使用短脉冲以获得最佳垂直分辨率，但以牺牲垂直探测距离为代价；高模式，使用较长脉冲及较粗分辨率，以最大化高度覆盖。

4.3.2 运行与频率方面

大天线孔径和高平均发射功率成本高昂。风廓线雷达的天线和功率放大器成本通常占整套安装系统总成本的一半以上。因此，在这些领域通过技术升级来提升性能属于高成本方案。

然而，就天线孔径而言，还存在另一个决定其最小尺寸的因素。风廓线雷达通过将主波束依次转向不同（至少三个）独立方向来运行。早期系统采用约75°仰角的两个或四个正交方位角，有时也指向天顶进行数据采集。较新的天线设计则赋予了波束转向极大的灵活性。天线波束宽度必须足够窄，以区分多个波束位置。3°至10°的3 dB全波束宽度是可用的，分别对应36 dBi至27 dBi的天线增益。增益通过方程(4-19) 决定有效孔径：

$$A_e = 10^{G/10} \lambda^2 / 4\pi \quad (4-19)$$

由于射频频谱的干扰、拥塞及其相关的监管规定，风廓线雷达的频率无法自由选择。一些高要求应用，例如日本的MU研究雷达以及美国东部和西部航天发射场的雷达，促使了工作在50 MHz附近、孔径极大（约10 000 m²）、功率强劲（峰值250 kW或以上，平均12.5 kW或以上）、脉冲短（1 μs）的雷达得以应用。研究人员也在40至70 MHz频段内，以不造成干扰为前提运行过其他风廓线雷达。

例如，根据脚注RR No. 5.162A，工作在46-68 MHz频段VHF风廓线雷达可提供高达30 km高度的风廓线，因此是气象系统的重要组成部分。VHF风廓线雷达的典型规格如下：

- 峰值功率10-80 kW，平均功率低于2 000 W。
- 天线通常包含100个以上的单元阵列，发射和接收模式下的分组方式不同，增益为20-30 dBi。
- 通常垂直对准，但可偏离天顶最多20度。VHF雷达的高度分辨率在150-1 500 m范围内，具体取决于脉冲持续时间及剖面高度。
- 通常所需带宽为1 MHz。

工作在400-500 MHz频段的风廓线雷达设计用于（另见建议书ITU-R M.1085）：

- 使用增益通常为32-34 dBi的天线，测量雷达上方约0.5-16 km处的风廓线，低空垂直分辨率为150-250 m，高空为300-1 000 m；
- 探测低空和高空时的平均功率分别约为500 W和2000 W；
- 运行所需带宽小于2 MHz。

提高风廓线雷达的工作频率可提升测量分辨率，但代价是降低测量的整体高度可用性。因此，工作在915 MHz和1 270-1 375 MHz频段的雷达通常被视为边界层风廓线雷达，仅能测量大气最低几公里内的风廓线。这些雷达使用增益低于30 dBi的天线，平均功率约50 W，运行所需带宽约2.5 MHz，可实现约100 m的垂直分辨率。

例如，一套固定安装的482 MHz风廓线系统生成的风速随高度变化图如图4-25和图4-26所示。每条风羽的朝向代表风向，是高度（纵轴）和时间（横轴）的函数，而其颜色代表风速。

图4-25中的曲线图显示了所谓低模式的数据，使用了1 700 ns的短脉冲宽度，采样范围高达约10.5 km。图4-26给出了使用4位3 300 ns脉冲（采用互补序列的二进制相位编码进行脉冲压缩）的高模式数据。注意，其距离采样仅从约5 km高度开始，但向上延伸至约15 km。

图4-25

风速随高度变化 – 低模式（1700 ns脉冲）

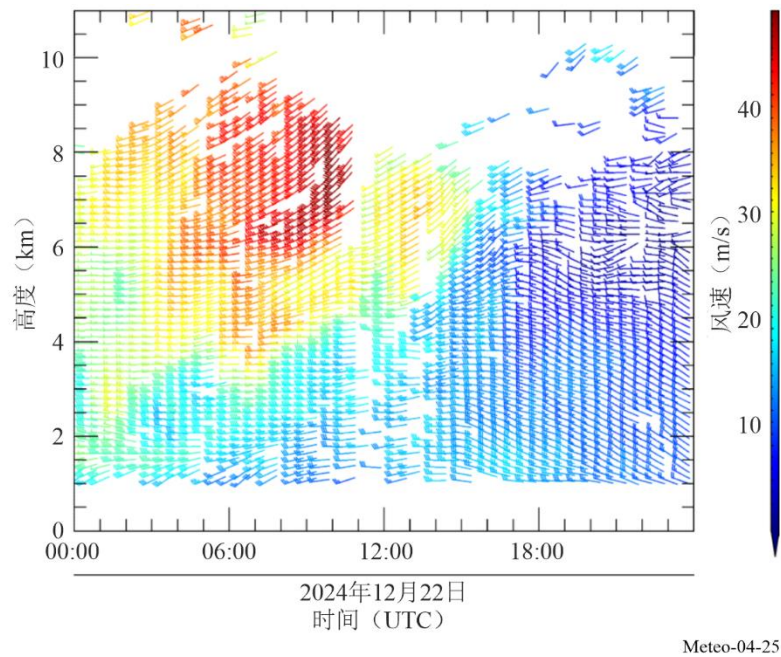
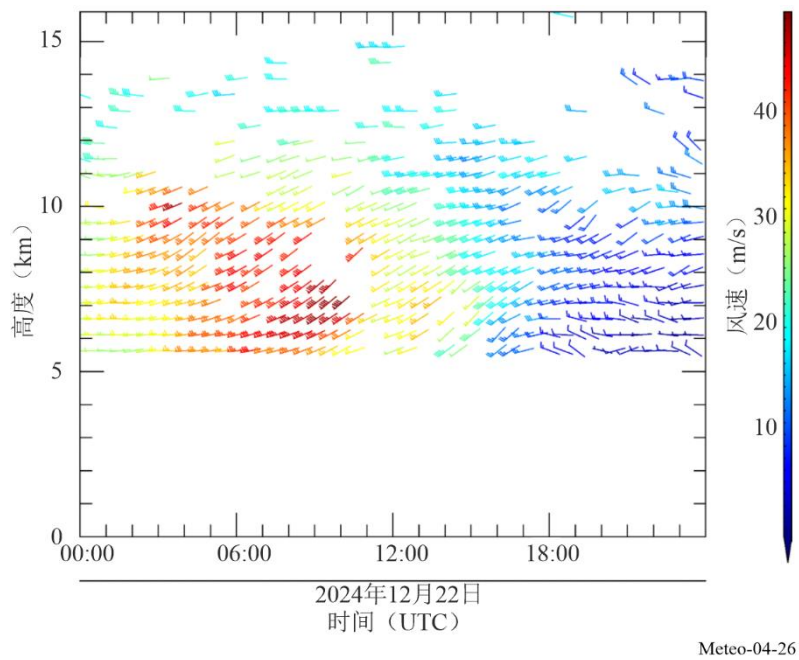


图4-26

风速随高度变化 – 高模式（3 300 ns脉冲，4位相位编码）



4.3.3 当前及未来的频谱需求

风廓线雷达是地基系统，天线高出地面1至2米，波束基本垂直指向。地理隔离和地形屏蔽能有效防护风廓线雷达与其他雷达之间的相互干扰。因此，一个风廓线雷达网络，若在平坦地形上间隔至少50公里（在崎岖或多林地形上间隔可更小），可在同一频率上运行。基于这些理由，风廓线雷达往往更容易与地面业务兼容。然而，由于风廓线雷达向上观测，其与卫星系统的共存可能难以实现。在此情形下，共享同一频段并非切实可行的解决方案。

普遍认为，VHF风廓线雷达需要0.5-1.5 MHz带宽，400 MHz附近的UHF系统需要2至3 MHz带宽，而1 000 MHz或1 300 MHz附近的风廓线雷达则需要2.5 MHz带宽。可以认为，决议217（WRC-23修订版）的下列规定足以满足这些需求：

“……促请各主管部门在以下频段内部署作为无线电定位业务系统的风廓线雷达，同时应适当关注与这些频段内其他业务及其他业务电台指配可能存在的兼容性问题，从而适当考虑地理隔离原则，特别是针对邻国，并铭记每项业务的类别：

- 依据第5.162A条，46-68 MHz
- 440-450 MHz
- 依据第5.291A条，470-494 MHz
- 仅限第2区，904-928 MHz
- 1 270-1 295 MHz
- 1 300-1 375 MHz； ”

“……若在440-450 MHz或470-494 MHz频段内无法实现风廓线雷达与其他无线电应用的兼容，可考虑使用420-435 MHz或438-440 MHz频段； ”

4.3.4 风廓线雷达的共用方面

WRC-97为风廓线雷达分配的频段经过精心挑选，以最大限度降低与该频段其他用户相互干扰的可能性。在为风廓线雷达确定频段之前，曾在400.15-406 MHz频段内部署了一个实验网络。业务运行经验表明，风廓线雷达在400.15-406 MHz频段内的运行会对COSPAS-SARSAT系统造成干扰。

因此，决议217（WRC-23，修订版）明确了供风廓线雷达使用的频谱，并特别指出风廓线雷达不应在400.15-406 MHz频段内运行。该实验网络的存在确实提供了大量关于风廓线雷达与其他业务兼容性的信息。这些风廓线雷达在水平方向的等效全向辐射功率谱密度约为：

- 中心频率（449 MHz）处：-18 dB(W/kHz)
- 偏移0.5 MHz处：-36 dB(W/kHz)
- 偏移1 MHz处：-55 dB(W/kHz)
- 偏移2 MHz处：-70 dB(W/kHz)
- 偏移4 MHz处：-79 dB(W/kHz)

这些较低数值，加上低天线高度以及与地球表面传播成 $1/r^4$ 比例关系的路径损耗，使得地理隔离成为一种非常有效的共用手段。

然而，在主波束方向上，等效全向辐射功率谱密度要高出57 dB，因此，机载和星基接收机会受到高得多的干扰电平。与 $1/r^2$ 成比例的路径损耗进一步加剧了这一问题。后续为缓解400.15-406 MHz频段内风廓线雷达问题的努力表明，404 MHz风廓线雷达所使用的调制方式对其共用特性有显著影响。目前，脉冲采用相位编码以区分每个脉冲内的两到三个“码片”，从而实现脉冲压缩。若不进一步编码，发射频谱将由间隔为PRF的谱线组成。然而，一个长度为64的伪随机相位码序列中的一个码元被依次施加到每个脉冲上，使得谱线以PRF/64的间隔出现，且谱线功率降低64倍。此外，当Cospas-Sarsat卫星出现在风廓线雷达地平线以上超过41度时，发射机在计算机控制下关闭。（由于此类卫星数量极少，这对风廓线雷达数据的损失可忽略不计。）

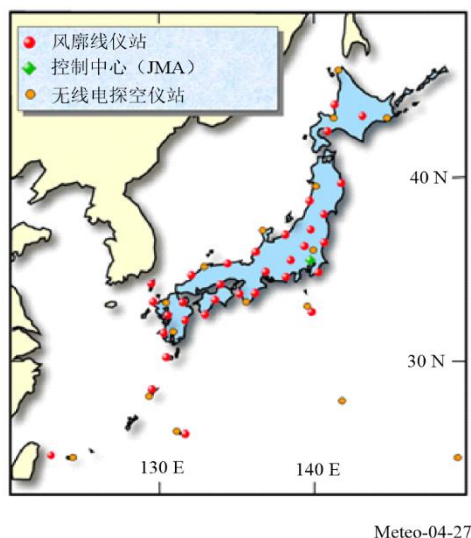
施加于404 MHz风廓线雷达发射信号的相位编码必须在接收机中“解算”。因此，来自其他非风廓线雷达系统的干扰在风廓线雷达看来呈现为非相干的类噪声特性。故而，风廓线雷达的最小可检测信号约为-170 dBm，而干扰仅在电平达到-135 dBm或更高时才构成困扰。

作为与风廓线雷达共用的另一示例，1 215-1 300 MHz频段在WRC-2000上被分配给了无线电导航卫星业务。此后，开展了若干技术研究以评估这些RNSS系统与工作在1 270-1 295 MHz频段的风廓线雷达之间的兼容性。研究结果见ECC报告90。该报告得出结论，在某些情况下，RNSS系统可能会干扰并降低风廓线雷达（至少是三波束风廓线雷达）的业务运行。不过，报告列举了一系列（硬件或软件）缓解技术，可帮助克服这些困难。其中部分技术包括选择天线指向、增加波束数量，或将风廓线雷达频率设定在1 274 MHz或1 294 MHz（即RNSS调制的零点频率），后者可能是更易实施的方案。

日本气象厅（JMA）运行着一个风廓线雷达网络与数据采集系统（WINDAS），用于监测和预测强天气事件的发展。该网络由部署在日本各地的33部1.3 GHz风廓线雷达组成，它们与位于东京日本气象厅总部的控制中心进行通信（见图4-27）。

图4-27

风廓线雷达网络示例



随后，数据通过全球电信系统分发至世界各地，也可在日本气象厅网站（<http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>）上获取。此外，该数据与多普勒雷达及商用飞机的数据相结合，以提供全面的“高空风分析”。

4.4 海洋学高频雷达

在海洋学领域，高频（HF）雷达是一种用于监测海面流、波浪及风向的遥感技术。这些雷达系统工作在高频无线电频段（3-30 MHz），通过布拉格散射现象提取海面信息。

在此背景下，布拉格散射描述的是无线电波与海面波浪相互作用后的叠加效应，其中海面波的波长恰好为无线电波长的一半。海洋学雷达具有相干性，可利用由海面运动引起的多普勒频移来估算海面流速。

目前，海洋观测雷达系统采用多种类型的天线。部分系统使用3单元八木天线或相控阵系统，通过多组八木天线在方位角方向进行扫描，从而限制海洋学雷达信号的传播范围。海洋学雷达主要采用两种发射技术：连续波（CW）脉冲和线性调频连续波（FMCW）啁啾信号。

雷达通常沿海岸线组网部署，可提供离岸最远200公里广阔沿海区域的信息。全球目前约有500套此类系统。这些系统分布在三个ITU区域，其中大部分部署在北美洲、欧洲和亚洲沿岸。预计未来20年内，系统数量将翻一番。

ITU在WRC-12上批准了决议**612（WRC-12，修订版）**，为海洋学高频雷达提供了详细的频谱空间。各ITU区域的频段划分如表4-6所示。

表4-6

为海洋学高频雷达划分的频段及总频谱宽度

划分频段（kHz）		
ITU第1区	ITU第2区	ITU第3区
4 438-4 488		
5 250-5 275		
9 305-9 355	本区域无划分	9 305-9 355
13 450-13 550		
16 100-16 200		
24 450-24 600		
26 200-26 350		
39 000-39 500	本区域无划分	39 500-40 000
42 000-42 500	本区域无划分	本区域无划分

参考文献

Springer Handbook of Atmospheric Measurements | SpringerLink – Chapter 31 (2021)

Cambridge University Press Atmospheric Radar (2016)

Radar for Meteorological and Atmospheric Observations | SpringerLink (2014)

第5章

用于气象及相关环境活动的 无源和有源航天遥感

5.1 引言

气象卫星的存在在世界大部分地区已广为人知，其生成的图像定期出现在电视、大众媒体和互联网上。如今，公众已习惯于观看经过色彩增强和与地图配准的图像，显示云盖、地表温度、积雪覆盖及其他天气现象；或不那么常见地，显示野火分布及其产生的烟云、火山灰，以及因厄尔尼诺现象而受到广泛关注的表层海水温度。

其中许多产品的共同点是，它们主要由可见光和红外波段传感器记录的数据生成。然而，众多此类产品及其他产品是利用多种微波频率单独或结合其他频率测量生成的。

因此，利用从VHF至微波乃至频谱更高频段无线电频率进行的地球表面及大气航天遥感，在业务和研究气象学（特别是减轻天气及气候相关灾害影响）以及气候变化及其影响的科学认知、监测与预测方面，具有至关重要且与日俱增的作用，这一点并未广为人知。

近年来在天气和气候分析与预报（包括对影响所有人群和经济的危险天气现象：强降雨、风暴、气旋等的预警）方面取得的令人瞩目的进展，在很大程度上归功于航天观测数据及其在数值模式中的同化。

遥感（无源与有源）对数值天气预报（NWP）性能提升贡献显著，在所有实时模式ingest的观测中，其对预报技巧改进的贡献占比达50%（无源传感器40%，有源传感器10%）。鉴于对预报技巧提升的高贡献度，天气预报所带来的显著社会经济收益中，很大一部分可归因于气象和地球观测卫星上搭载的无源与有源微波传感器。

目前广泛采用的航天遥感分为两类：**无源与有源**，主要在非地球静止轨道卫星上以地球探测卫星业务（EESS）运行，尽管部分计划中的EESS（无源）系统未来将在地球静止轨道运行。

无源传感仅使用纯接收机，不涉及发射机。这些接收机所搜寻的辐射是自然产生的，功率电平极低，且包含所研究物理过程的关键信息。感兴趣的是指示特定化学物质存在的辐射峰值，或指示大气气体吸收频率信号而导致的某些频率辐射缺失。特定频率信号的强弱或有无被用来判断特定气体（湿度和污染物是显而易见的例子）是否存在，若存在，则其含量多少、位于何处。通过工作在被测物质固有物理特性（分子辐射共振或吸收）决定的频段内的无源传感器，可感知种类广泛的环境信息，而这些物理特性无法在其他频段复制。给定频率下的信号强度可能取决于多个变量，因此需要使用多个频率以匹配多个未知量。多频率使用是测量大气和地球表面各种特征的主要技术手段。

有源传感与无源传感的区别在于，其涉及卫星上的发射机和接收机。通常信号由同一颗卫星发射并由其接收回波，尽管并非总是如此。有源传感的应用包括但不限于：测量海面特征（如海浪高度和风场），以及确定雨林中树木的密度。

两类遥感的兼容性问题涉及与其他空间业务相同的问题：卫星接收机与地面或空间其他射频发射站之间的相互干扰。这些问题的解决依赖成熟技术，通常涉及基于功率限制、天线特性以及时间与频率共享与其他用户进行协调。

无源航天遥感卫星特有的一种脆弱性形式，特别是那些具有大面积测量采样的卫星，源于每一次测量都可能受到来自地面大量发射机（包括带内和带外发射机）的累积辐射影响。因此，虽然单个地面发射机辐射的功率可能不足以造成无源传感测量误差，但大量此类发射机通过干扰信号聚合可能对正在进行的测量造成损害。来自多发射机的这种干扰聚合，正是人们对高密度移动应用或宽带移动（含国际移动通信IMT）、高密度固定业务（HDFS）发射、超宽带（UWB）应用、短距离设备（SRD）或工业、科研和医疗（ISM）设备等事项担忧的基础。正是此类发射机在测量区域内的空间密度与其各自特性的组合构成了潜在问题。随着此类地面有源设备密度的增加，情况日趋严峻，且已有有害干扰实例的报告。

若干地球物理参数在不同程度上对给定频率待观测的特定参数的自然发射产生影响。因此，必须同时在微波谱的多个频率上进行测量，以分离并反演各自对总体自然发射的贡献，并从给定测量集中提取所需参数。因此，影响任一“无源”频段的干扰都可能影响在一组预定频率上获得的特定大气成分的整体测量。

对于发射-接收对而言，信号的性质和特征是已知的，判断信号是否被正确接收相对简单。文献中充斥着用于处理无线电通信系统差错检测与纠正的实用技术，但遗憾的是，当各接收信号的特征未知时，这些技术毫无用处。无源遥感正是这种情况，其干扰脆弱性独一无二，因为这种脆弱性源于无源传感器设计用于接收的自然信号的非确定性本质，以及所测得的自然辐射功率极低。

无源传感器接收到的极低干扰电平也可能使其数据降级，而最大的威胁或许在于干扰未被察觉，被篡改的数据被误认为有效数据，且基于这些被篡改数据分析得出的结论将存在严重缺陷。在大多数情况下，无源传感器无法区分自然辐射与人造辐射，由此产生的数据误差既无法检测也无法纠正。因此，维持数据完整性目前似乎仅依赖于干扰的预防，以及在全球范围内对干扰和发射机最大功率实施监管限制。可以注意到，《无线电规则》中若干条款为使有源业务发射机功率受限，以保护无源传感器免受带内或带外干扰。

近年来，毫米波云雷达在研究应用中的使用引起了相当关注。需要加深对云在气候系统中作用的理解，这在气候变化研究中优先级极高。加之毫米波雷达技术的最新进展，这一研究需求成为毫米波云廓线雷达发展的驱动力。这些雷达主要工作在36 GHz附近（Ka波段）和94 GHz附近（W波段），现已为气候研究者提供必要的定性和定量信息。其对小水成物灵敏度高、空间分辨率高、受地物杂波影响极小，且体积相对较小，使毫米波雷达成为云研究的优良工具。它们可从固定地面、移动地面、机载和航天平台运行。

5.2 无源微波辐射测量

无源微波辐射测量是地球观测的一项至关重要的工具。在地球探测卫星业务（EESS）下，运行着旨在接收和测量地球表面及其大气所产生的自然辐射的无源传感器。这些自然辐射的频率和强度表征了若干重要的地球物理大气及地表参数（陆地、海洋和冰盖）的类型与状态，这些参数描述了地球/大气/海洋系统的状况及其机理：

- 地球表面参数，如土壤湿度、海面温度、海面风应力、海冰范围与年代、积雪覆盖、陆地降雨；
- 三维大气参数（低层、中层和高层大气），如温度廓线、水汽含量，以及对放射性及化学过程重要的微量气体（如臭氧、一氧化二氮和氯）的浓度廓线。

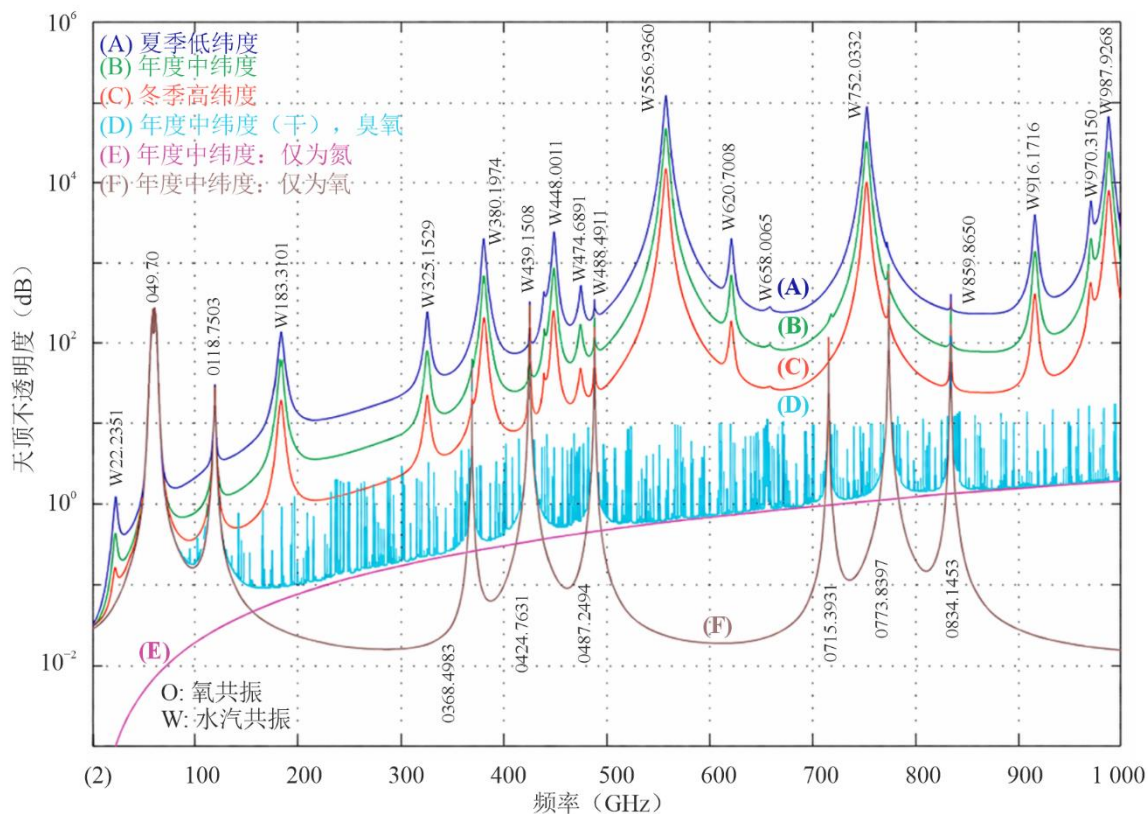
微波技术使得即使在云层覆盖的情况下，也能从地球轨道对地球表面及其大气进行观测，因为在100 GHz以下的频率，云层基本透明。这种全天候能力对地球观测具有重要意义，因为地球表面通常有60%以上被云层覆盖。除全天候能力外，无源微波测量不受昼夜限制，可全天时进行，因为不依赖日光。无源微波遥感是一种广泛用于气象、气候和环境监测与调查（业务和科学应用）的重要工具，对于这些应用，可靠且重复的全球覆盖至关重要。

5.2.1 频谱需求

若干地球物理参数通常在不同程度上对可在给定频率观测到的自然辐射做出贡献。因此，必须同时在微波谱的多个频率上进行测量，以分离并反演各自的贡献。如图5-1所示，大气的吸收特性以大气气体分子共振引起的吸收峰以及随频率显著增强的水汽连续谱为特征。在图5-1中，天顶不透明度指示了大气对特定频率电磁波的透明程度。不透明度越低，表明星载传感器能够成像的深度越接近地表。不透明度越高，则表明从太空进行的测量将更大程度地依赖于导致高不透明度的那些大气参数，通常是氧气或水汽。

图5-1

由水汽和干大气成分引起的大气天顶不透明度



Meteo-05-01

陆地和水表面的类似图表分别如图5-2和图5-3所示。这些图表清晰地表明，频谱的每一部分对各种物理参数的敏感性都是独特的。这正是无源测量必须工作在特定频率以测量其目标参数的原因。

最适合无源微波感测的频率选择很大程度上取决于大气特性：

- 用于观测地表参数的频率选在100 GHz以下，此处大气吸收最弱。平均每倍频程需要一个频率；
- 用于观测大气参数的频率主要在50 GHz以上、大气气体吸收峰内经过精心筛选。

1 000 GHz以下所需的频率及关注带宽列于表5-1。大多数100 GHz以上的频率划分包含重要大气痕量化学化合物的吸收谱线。

表5-1

1 000 GHz以下卫星无源感测的科学关注频段及带宽*

频段 (GHz)	带宽 (MHz)	主要测量内容
1.37-1.427	57	土壤湿度、盐度、海面温度、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	海面温度
4.95-4.99	40	海面温度
6.425-7.25 (RR 5.458)	350	海面温度 (无划分)
10.6-10.7	100	降雨率、雪水当量、冰形态、海况、海面风速
15.2-15.4	200	水汽、降雨率
18.6-18.8	200	降雨、海况、海冰、水汽、积雪、海面风速、土壤发射率与湿度
21.2-21.4	200	水汽、云液态水
22.21-22.5	290	水汽、云液态水
23.6-24	400	水汽、云液态水、大气探测相关通道
31.3-31.8	500	海冰、水汽、溢油、云、液态水、地表温度、50-60 GHz频段参考窗口
36-37	1 000	降雨率、积雪、海冰、云
50.2-50.4	200	大气温度廓线参考窗口 (地表温度)
52.6-59.3	6 700 ⁽¹⁾	大气温度廓线 (O ₂ 吸收线)
86-92	6 000	云、溢油、冰、雪、雨、118 GHz附近温度探测参考窗口
100-102	2 000	N ₂ O、NO
109.5-111.8	2 300	O ₃
114.25-122.25	8 000 ⁽¹⁾	Co、大气温度廓线 (O ₂ 吸收线)
148.5-151.5	3 000	N ₂ O、地球表面温度、云参数、温度探测参考窗口
164-167	3 000	N ₂ O、云水与冰、雨、CO、ClO
174.8-191.8	17 000 ⁽¹⁾	N ₂ O、水汽廓线、O ₃
200-209	9 000	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	O ₃
239.2-242.2	3 000	冰云粒子

表5-1（完）

频段 (GHz)	带宽 (MHz)	主要测量内容
244.2-247.2	3 000	冰云粒子
250-252	2 000	N ₂ O
275-286	11 000	N ₂ O, ClO
296-306	10 000	温度探测翼区通道、OXYGEN、HNO ₃ 、HOCl、N ₂ O、O ₃ 、O ¹⁷ O
313-356	43 000	水汽廓线、云、温度探测翼区通道、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
361-365	4 000	O ₃
369-392	23 000	水汽廓线、H ₂ O
397-399	2 000	水汽廓线
409-411	2 000	温度探测
416-434	18 000	氧气、温度廓线、O ₂
439-467	28 000	水汽廓线、云、HNO ₃ 、H ₂ O、O ₃ 、N ₂ O、CO
497-502	5 000	氧气温度廓线、水汽廓线翼区通道、O ₂ 、O ₃ 、N ₂ O、BrO
523-527	4 000	水汽廓线翼区通道
538-581	43 000	水汽廓线、ClO、H ₂ O、O ₃ 、HNO ₃
611-630	19 000	水汽廓线、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	水汽廓线翼区通道、HOCl、H ₂ ¹⁸ O、SO ₂ 、ClO、HO ₂ 、BrO、HNO ₃ 、O ₃ 、NO、N ₂ O
657-692	35 000	水汽廓线、云、H ₂ O、HO ₂ 、ClO、CH ₃ Cl、CO
713-718	5 000	O ₂
729-733	4 000	HNO ₃ 、O ¹⁸ O
750-754	4 000	H ₂ O
771-776	5 000	O ₂
823-846	23 000	O ₂
850-854	4 000	NO
857-862	5 000	H ₂ O
866-882	16 000	云、窗口
905-928	23 000	H ₂ O
951-956	5 000	O ₂ 、NO、H ₂ O
968-973	5 000	H ₂ O
985-990	5 000	H ₂ O

* 注 – 关于无源传感器频率划分的最新信息，请参阅《无线电规则》第5条的频率划分表。关于无源感测优选频率的更多信息，请参阅建议书ITU-R RS.515的最新版本。

⁽¹⁾ 该带宽由多个通道占用。

5.2.2 地球表面特征观测

为测量地表参数（如水汽、海表温度、风速、降雨率），必须选择辐射“窗口”通道，以实现1 GHz至90 GHz微波频谱的规则采样（平均每倍频程一个频率）。在某些情况下，无需极高精度的频率选择，因为地表参数的自然辐射对频率的依赖性不强。通常，若干地球物理参数会在不同程度上对可在给定频率观测到的自然辐射产生影响。图5-2和图5-3展示了自然微波辐射对不同地球物理参数的频率敏感性，对此进行了说明。亮温是衡量物体热辐射强度的物理量，以温度为单位，这是因为辐射强度与辐射体的物理温度之间存在相关性。

5.2.2.1 海洋表面观测

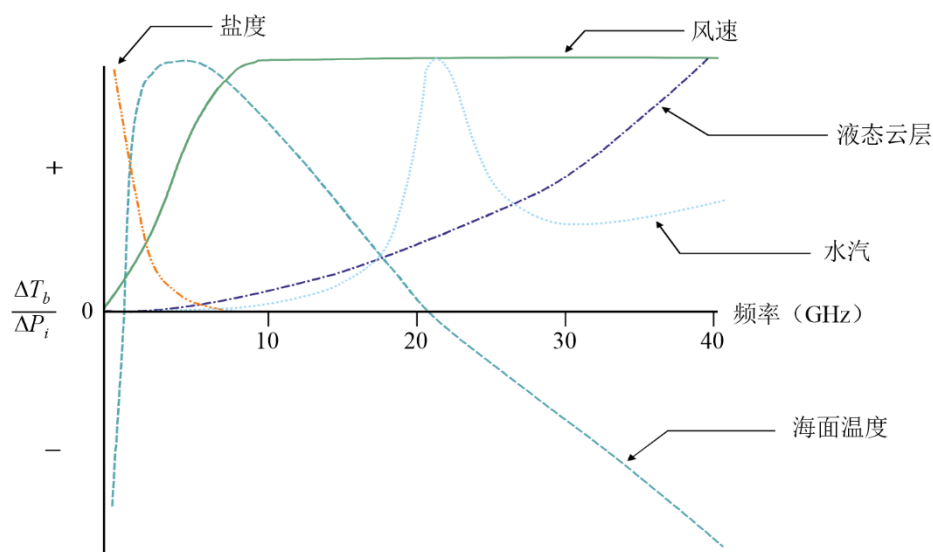
海洋表面遥感用于测量许多与陆地相同的参数（如水汽、降雨率、风速），以及能提供海洋自身状态信息的参数（如海面温度、海洋盐度、海冰厚度）。

图5-2展示了亮温对海洋表面地球物理参数的敏感性：

- 低频（典型值约1.4 GHz）测量可用于获取海洋盐度；
- 约6 GHz的测量对海表温度具有最佳灵敏度，但其中包含少量由盐度和风速引起的贡献，可通过约1.4 GHz和约10 GHz的测量予以剔除；
- 17-19 GHz频段内，海表温度与大气水汽的特征信号最弱，是观测海面发射率的最佳窗口，而发射率与近海面风速或海冰存在直接相关。此外，海表温度对水汽总含量和液态云也有一定敏感性；
- 水汽总含量的最佳测量频段约为24 GHz，而液态云信息则可通过约36 GHz的测量获取；
- 对于许多应用而言，确定主要海洋参数需要五个频率（约6 GHz、10 GHz、18 GHz、24 GHz和36 GHz）。

图5-2

亮温对海洋表面地球物理参数的敏感性



Meteo-05-02

5.2.2.2 陆地表面观测

陆地表面遥感相对更为复杂，这是由于地表特征（从冰雪覆盖区到沙漠和热带雨林）具有高度的时空变率。此外，无源传感器接收到的信号需穿过多种不同介质传播：土壤，可能还有积雪和/或冰层，植被层，大气和云层，有时还包括降雨或降雪。第二个需要考虑的因素是，对于每种介质，多个因素都可能影响其辐射。例如，土壤的亮温会因其实际温度、土壤含水量、地表粗糙度以及土壤质地而异。同样，植被的贡献将与冠层温度和结构相关，具体通过不透明度和单次散射反照率（即反射光与入射光之比）体现。这些因素对信号的影响方式在频率上具有相互依赖性。图5-3描绘了若干关键参数的归一化灵敏度随频率的变化关系。

图5-3表明，在陆地及温带平均区域，有必要具备以下观测能力：

- 低频（约1 GHz）以测量土壤湿度；
- 5 GHz至10 GHz频段的测量，以便在已知土壤湿度贡献后估算植被生物量；
- 水汽吸收峰附近的两个频率（典型值为18-19 GHz和23-24 GHz），以评估大气贡献；
- 约37 GHz的频率，用于结合18 GHz评估云液态水，和/或结合10 GHz评估植被结构，以及结合1 GHz和5 GHz或10 GHz评估地表粗糙度。

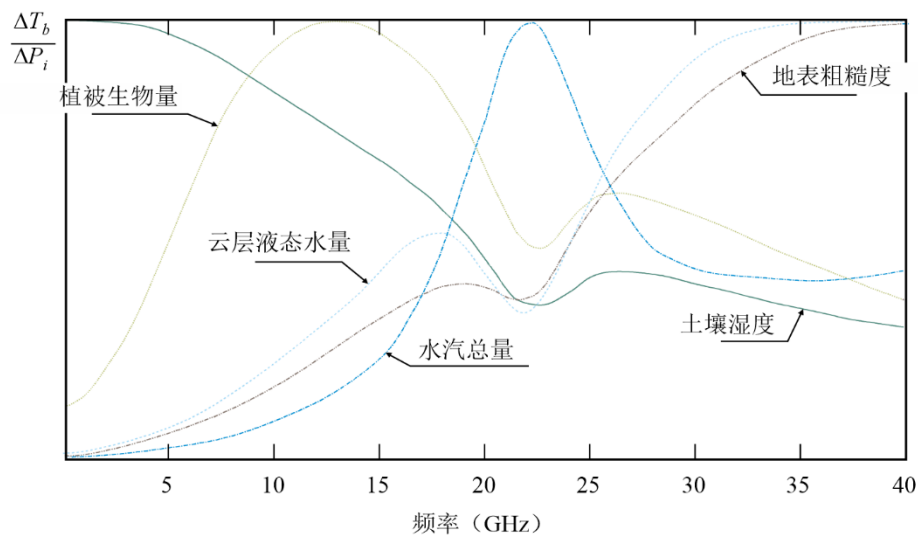
85 GHz或90 GHz的频率可用于降雨监测，但这仅在能够通过较低频率评估所有其他影响因素时才有效。

通过使用扫描多通道微波辐射计（SMMR）和专用微波/成像仪（SSM/I）的研究表明，还可以反演其他若干变量。例如，在能够估算地表和大气贡献的情况下，利用19 GHz附近的通道可获取地表温度（其精度虽低于红外测量，但具备全天候能力）。

积雪覆盖区是重要的监测对象，而在此领域，多频率测量的必要性同样至关重要。实际上，不仅需要区分雪和冰，还需辨别积雪的新鲜程度。相关信号与积雪层的微观结构及晶体尺寸相关联。研究表明，要获取此类信息，通常需要19 GHz、37 GHz以及85-90 GHz等多个频率。

图5-3

亮温对陆地表面地球物理参数的敏感性



Meteo-05-03

5.2.2.3 其他遥感仪器的辅助参数

星载雷达高度计目前在全球海洋和陆地表面运行，在海洋学和气候学领域具有重要应用（见第5.2.3节）。为消除大气引起的折射效应，利用例如约13.5 GHz获取的高精度测高数据时，需辅以约18.7 GHz、24 GHz、31 GHz或36 GHz的一组无源测量，以及一些高频通道，以提升海岸线附近的测量精度。

为分离卫星测量信号中的不同贡献源，必须能够同时获取至少五个不同频率的测量数据。

5.2.3 性能参数

无源传感器的特性由其辐射灵敏度和几何分辨率决定。

5.2.3.1 辐射灵敏度

该参数通常表示传感器能够检测到的最小温差 ΔT_e 。 ΔT_e 由下式给出：

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

式中：

- B ：接收机带宽（Hz）
- t ：积分时间（s）
- a ：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 辐射计阈值 ΔP

这是无源传感器能够检测到的最小功率变化。 ΔP 由下式给出：

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

式中：

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

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 τ 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

对于地表参数的二维测量，通常认为天线的-3 dB波束宽度决定了横向分辨率。而对于大气参数的三维测量，还必须考虑沿天线轴的纵向分辨率。该纵向分辨率是大气频率相关特性以及接收机噪声与带宽性能的复杂函数。

5.2.3.4 积分时间

辐射计接收机探测由天线收集的类噪声热辐射以及接收机自身的热噪声。通过对接收信号进行积分，可以降低随机噪声波动，从而对接收机噪声与外部热发射噪声功率之和做出准确估计。积分时间即接收机对接收信号进行积分所需的时间。积分时间也是无源遥感的重要参数，它是综合考虑所需几何分辨率、传感器扫描配置及其相对于观测场景的速度后，进行复杂权衡的结果。

5.2.4 无源传感器的典型运行条件

无源星载传感器主要部署在两类互补的卫星系统上：低地球轨道卫星和地球静止轨道卫星。

5.2.4.1 低地球轨道卫星

基于太阳同步（即卫星每天在同一地方太阳时经过地球表面任意给定点的轨道）极轨低轨卫星的系统，用于获取全球尺度的高分辨率环境数据。此类轨道的特性限制了测量的重复频率。单颗卫星每日最多可获得两次间隔12小时的全球覆盖。在极地区域，重复观测次数每日可达14次。这是因为低地球轨道卫星每天绕地球运行14圈，且轨道轨迹在极地区域汇聚。目前，工作频率低于100 GHz的无源辐射计仅搭载于低轨卫星。这主要是由于在较高轨道上难以在相对较低的频率下获得足够的几何分辨率；然而，未来这种情况可能会改变。

5.2.4.2 地球静止轨道卫星

基于地球静止轨道卫星的系统用于获取区域尺度的中低分辨率数据。其测量的重复频率仅受限于硬件技术。

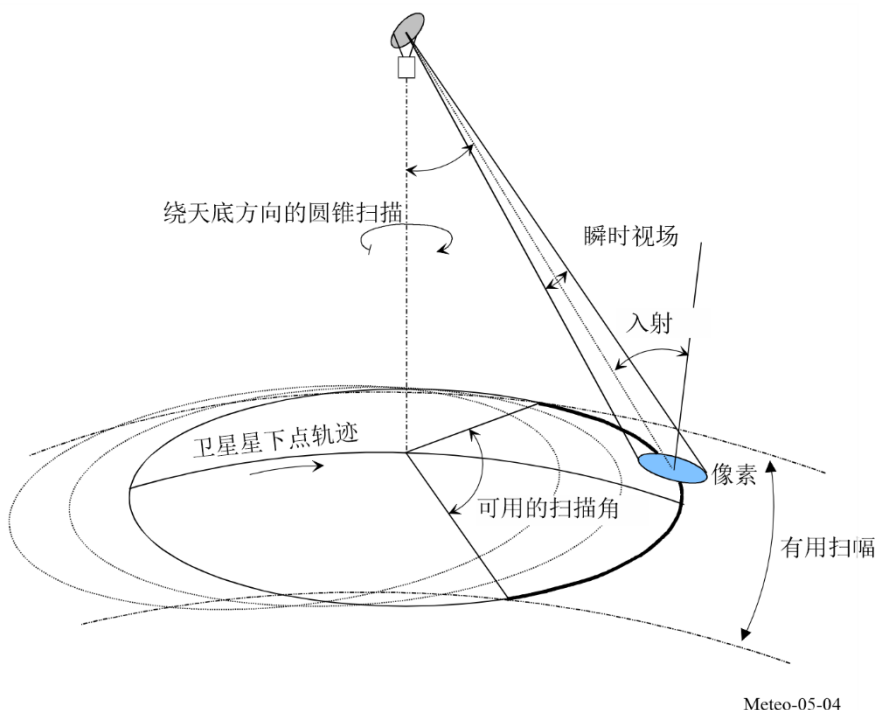
5.2.5 观测几何

5.2.5.1 圆锥扫描

大多数专为地球表面特征成像设计的无源微波传感器采用以天底（即卫星正下方的点）方向为中心的圆锥扫描构型（见图5-4），因为对于地表测量的解译而言，保持整条扫描线上恒定的地面入射角至关重要。圆锥扫描仪器的几何结构如图5-4所示。

图5-4

圆锥扫描微波辐射计的典型几何结构



其典型几何特征（对应803公里高度）如下：

- 地面入射角约55度；
- 相对于天底方向的半锥角为46.7度；
- 刈幅宽度：1 600公里（受扫描构型限制），使得单台仪器在中高纬度地区每日可实现两次完整覆盖；
- 像元尺寸随频率和天线尺寸变化，典型值从6.9 GHz时的50公里到89 GHz时的5公里（基于2米有效天线直径）；
- 扫描周期和天线馈源布局的选择旨在确保所有测量频率下的全覆盖和最佳积分时间（进而确保辐射分辨率），代价是增加了硬件复杂度。

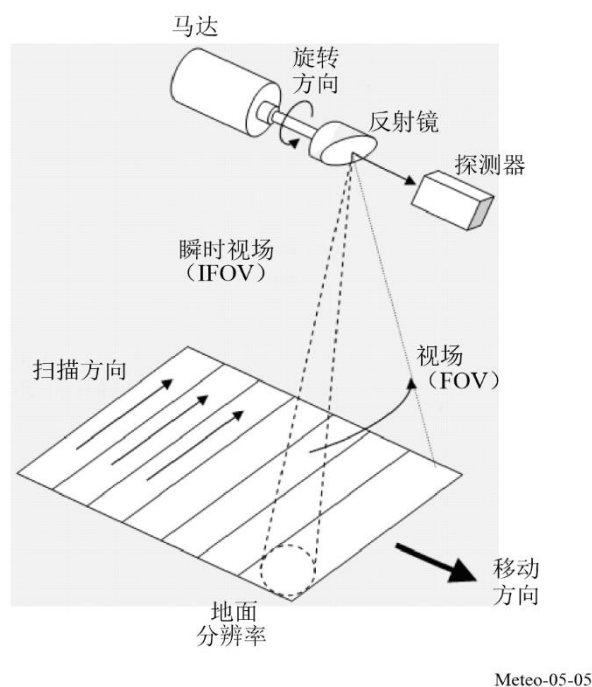
5.2.5.2 跨轨扫描

微波辐射计的另一种常见几何结构是跨轨扫描。采用此几何结构的传感器沿垂直于卫星运动的方向进行测量。这通常通过卫星上的旋转反射面实现，如图5-5所示。

跨轨扫描使微波辐射计能够在宽刈幅范围内进行测量，同时也能在天底方向进行测量，该方向的大气路径效应最小。

图5-5

跨轨扫描微波辐射计的典型几何结构



在此几何结构下，传感器的视场（FOV）在地面上的大小随观测角（即星下点与天线峰值增益方向之间的夹角）变化。当传感器指向星下点时，视场尺寸最小。

在旋转的部分时段，传感器将指向地球以外。该时段内的测量用于校准，即用于将传感器指向太空（作为参考冷负载）和指向航天器上的热校准负载。

跨轨扫描传感器的典型特征（对应830公里高度）如下：

- 离天底指向角范围：-50度至+50度（即从航天器一侧到另一侧）；
- 刈幅宽度：2 300公里；
- 扫描周期：2-8秒；
- 像元尺寸沿扫描方向变化，同时也随频率和天线尺寸变化。

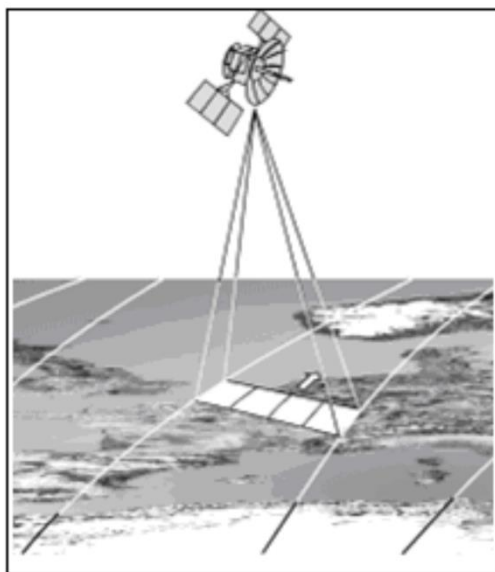
5.2.5.3 推扫

鉴于需消除雷达高度计测量中的大气效应，也可采用非扫描型天底指向仪器为特定应用提供辅助数据。为便于其在卫星上搭载，目前正在开发干涉测量技术，主要旨在提升低频段的空間分辨率。此类传感器将使用固定的小型天线阵列，而非大型扫描天线。

“推扫”（沿轨）传感器是一种由一排近似垂直于航天器飞行方向排列的传感器构成的系统，如图5-6所示。随着航天器向前飞行，可探测到地表的不同区域。推扫式辐射计是一种纯静态仪器，无任何活动部件。其主要特点是扫描线上所有像元的获取是同时进行的，而非像机械扫描传感器那样按顺序获取，这使得此类传感器能显著提高可实现的辐射分辨率；然而，由于缺乏扫描机制，以精细的几何分辨率对宽刈幅进行成像更为困难。推扫传感器可用于多种应用，包括大气温度廓线、土壤湿度和海洋盐度的测量。

图5-6

推扫式无源微波辐射计的典型几何结构



Meteo-05-06

关于EESS（无源）应用的测量类型，详见建议书ITU-R RS.1861。

5.2.6 性能与干扰准则

工作在地球探测卫星业务下的星载无源传感器的性能与干扰准则载于建议书ITU-R RS.2017。

5.2.7 大气参数的三维测量

电磁频谱中包含许多特定频段，由于分子共振效应，大气中的某些气体会在这些频段发生吸收现象（见图5-1）。此类现象发生的频率是该气体的特征标识（如 O_2 、 O_3 、 H_2O 、 ClO ）。吸收系数取决于气体的性质、浓度及其温度。通过在星载平台上组合使用这些频率附近的无源测量，可以反演温度、水汽和/或吸收气体的浓度廓线。对于工作在200 GHz以下的无源遥感传感器而言，50 GHz至70 GHz之间的氧气共振频率、118.75 GHz频率以及183.31 GHz的水汽共振频率尤为重要。

波长为 λ 的吸收气体会以与自身温度 T 和吸收率 α 成正比的能级（在同一频率下）辐射能量。这遵循公式(5-3)给出的关系：

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

式中：

l ： 温度为 T 时气体的光谱亮度

$L = 2 \cdot k \cdot T / \lambda^2$ ： 温度为 T 时黑体的光谱亮度（W/（ $m^2 \cdot sr \cdot Hz$ ））

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

α ： 表征气体（ O_2 , CO_2 , H_2O , O_3 等）特性的吸收系数

在气象无源遥感中， CO_2 和 O_2 这两种大气气体起着主导作用，因为它们在大气中的浓度和压力（决定吸收率 α 的两个参数）几乎恒定且全球已知。因此，可以通过在相应吸收带内不同频率进行辐射测量来获取大气温度廓线（通常 CO_2 利用红外区约15 μm 波段， O_2 利用微波区约60 GHz和118.75 GHz波段）。

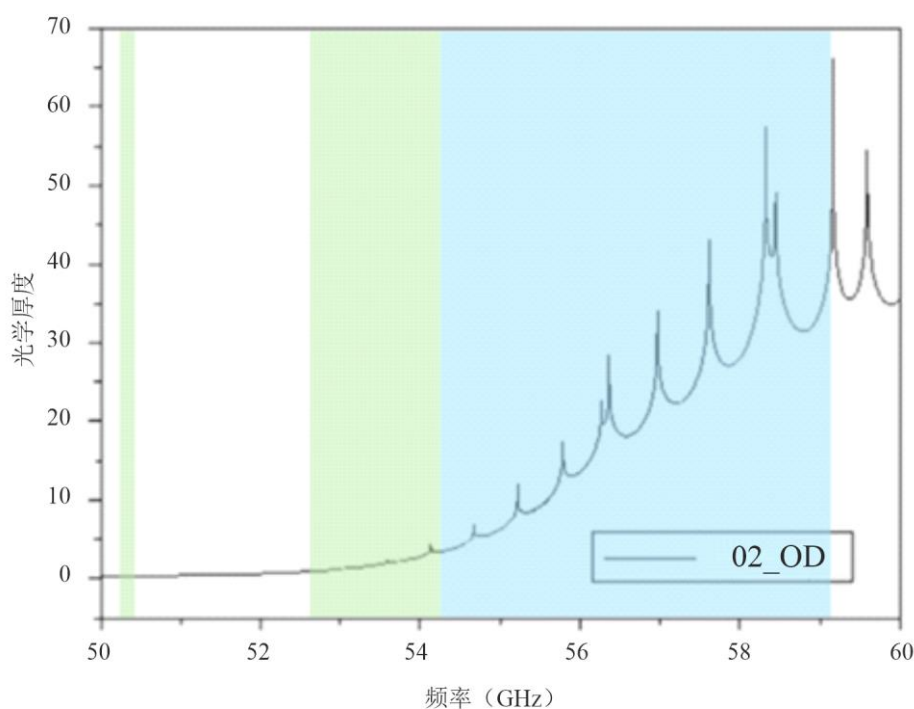
此外，还会收集其他在放射性和化学上重要、但浓度可变且未知的大气气体（ H_2O 、 O_3 、 CH_4 、 ClO 等）在其特定吸收带的辐射测量数据。但在这种情况下，必须先获知大气温度廓线，才能反演这些气体的未知垂直浓度廓线。

5.2.7.1 无源微波大气垂直探测仪

大气探测是对大气柱物理特性（如气压、温度、风速、风向、液态水含量、臭氧浓度、污染及其他特性）垂直分布的测量。垂直大气探测仪（即执行大气探测测量的仪器）为天底指向传感器，主要用于反演大气温度和湿度垂直廓线。它们利用在大气 O_2 和 H_2O 吸收谱内精心挑选的频率通道。图5-7至图5-9展示了200 GHz以下主要共振频率附近的吸收光谱详情。需注意，183 GHz附近的水汽吸收光谱随气候带和当地天气条件变化显著。

图5-7

50至60 GHz频段 O_2 光学厚度（多重吸收谱线）

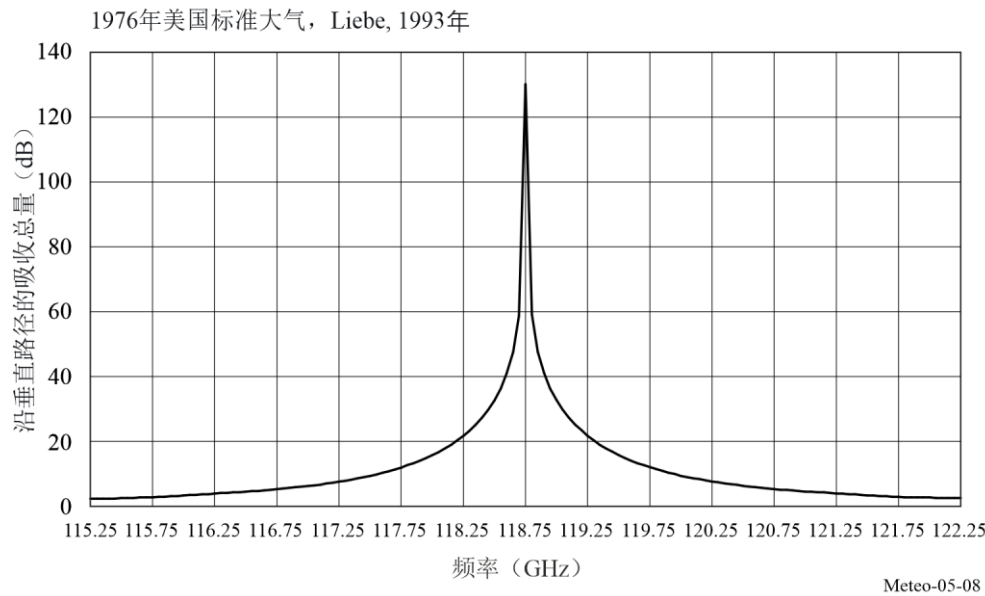


Meteo-05-07

注 – 图5-7同时描绘了50至60 GHz频段内地球探测卫星业务（无源）的划分及其状态：50.2-50.4 GHz（独占）、52.6-54.25 GHz（独占）及54.25-59.3 GHz（共用）。

图5-8

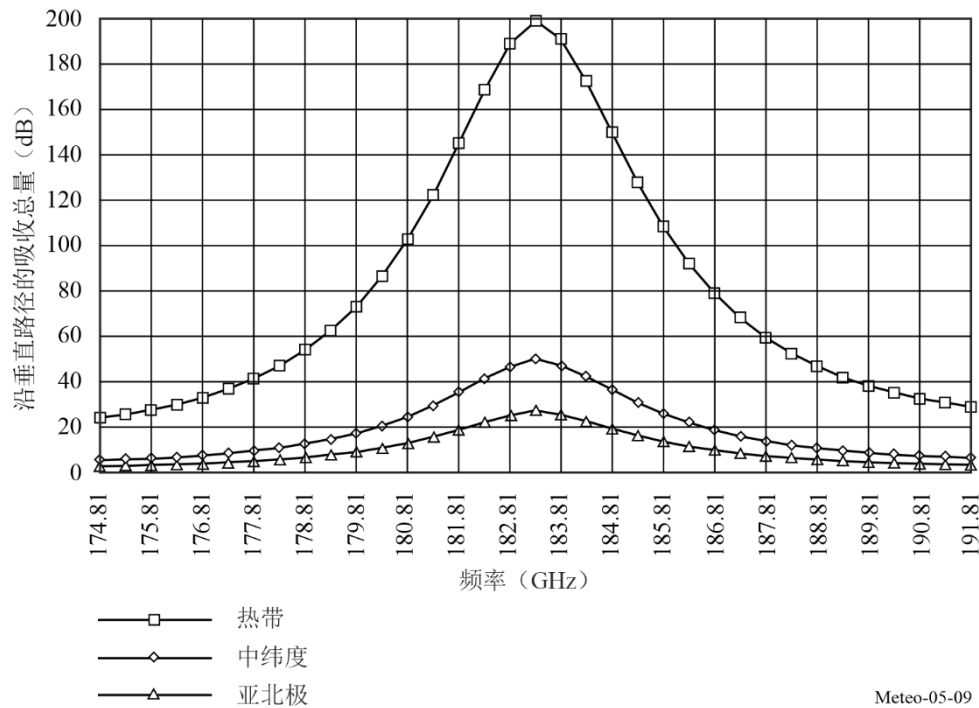
118.75 GHz附近垂直路径O₂吸收光谱（单一吸收谱线）



注 – EESS（无源）在114.25-116 GHz（独占）及116-122.25 GHz（共用）有划分。

图5-9

183.31 GHz附近垂直路径水汽吸收光谱



注 – EESS（无源）在以下频段拥有划分：174.8-182 GHz（共用）、182-185 GHz（独占）、185-190 GHz（共用）及190-191.8 GHz（独占）。

5.2.7.2 垂直大气探测机理

在航天垂直大气探测中，辐射计在不同频率（红外或微波）上测量从地表至大气层顶的大气总辐射贡献。

每一层（以其高度表征）辐射的能量与其局地温度和吸收率成正比。来自地表和低层大气的向上能量（朝向辐射计方向）会被高层大气部分吸收。

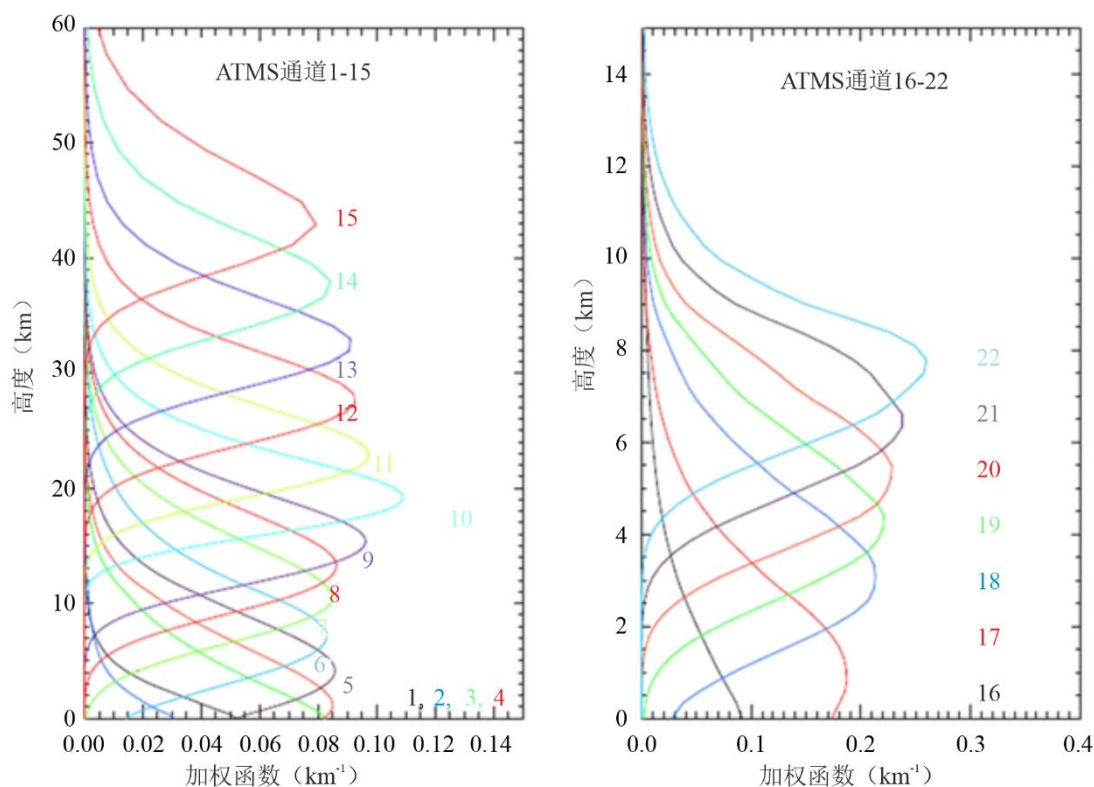
沿从地球表面到卫星的路径对辐射传输方程进行积分，反映了这一机理，并最终得到一个权重函数。该函数描述了各大气层按其高度的相对贡献，同时也代表了传感器的纵向（垂直）分辨率。

权重函数的峰值可出现在任意高度，并取决于所考虑频率下的吸收率。在吸收较弱的频率，峰值靠近地球表面；在吸收较强的频率，峰值靠近大气层顶。一台探测仪包含多个频率通道（例如见图5-10）。这些通道在吸收带内经极其精心的筛选，覆盖了广泛的吸收水平，以便从地表直至平流层高度获取最佳的大气样本。

图5-10展示了工作在60 GHz频段的微波测温仪的典型权重函数。

图5-10

工作在60 GHz附近的微波测温仪典型权重函数



此外，需特别强调通道1（23.8 GHz）、通道2（31.5 GHz）和通道15（90 GHz）（未在图5-10中显示）的特殊重要性。这些是辅助通道，在O₂吸收谱测量的反演过程中起主导作用。因此，它们必须具备相似的几何与辐射性能，并必须获得类似的抗干扰保护。

- 通道1靠近H₂O吸收峰，用于反演沿视线方向的总水汽含量，并确定其他通道所需的校正量。
- 通道2受氧气和水汽的累积影响最小，是观测地球表面的理想窗口通道，也是其他通道的参考基准。
- 通道15可探测大气液态水，用于消除其他通道测量中受降水影响产生的污染。

5.2.7.3 垂直大气探测的应用

垂直温度与湿度廓线主要用作数值天气预报（NWP）模式的输入场，这类模式至少需要每6小时进行一次初始化。全球NWP（全世界）模式用于生成时效为5至10天、空间分辨率约10公里的天气预报。此外，用于短时（6至48小时）精细化网格（数公里）预报的区域/本地模式也正日益增多。图5-11展示了来自AMSU-A无源微波传感器的全球温度（K）合成图，其数据是在约12小时内获取的。这些观测包含了来自地表的发射与反射，以及主要来自地表以上约5公里范围内氧气的发射（见图5-10）。

图5-11

AMSU-A全球温度测量（K）合成图

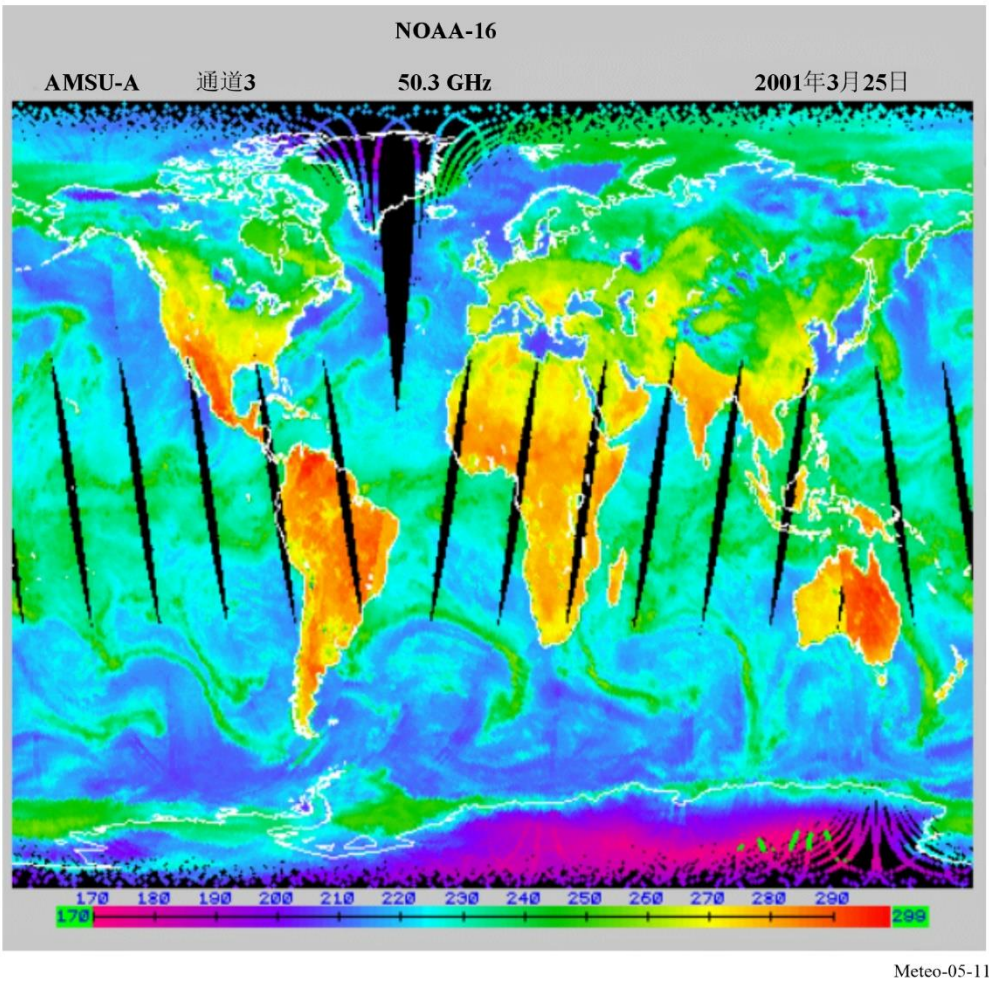
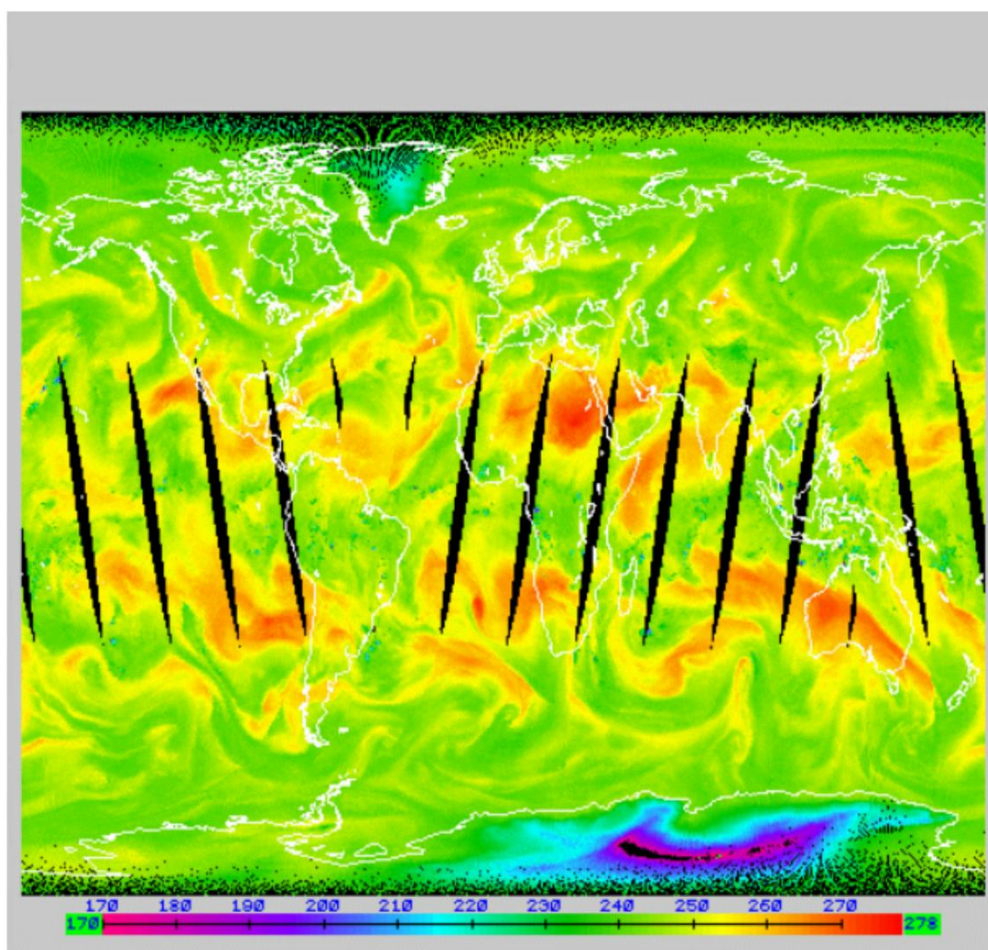


图5-12展示了来自AMSU-B的全球温度（K）测量合成图，其数据同样是在约12小时内获取的。AMSU-B是与AMSU-A协同工作的辐射计，旨在改进对流层水汽的探测。在183 GHz频段，当对流层上层干燥且传感器观测更接近地表时，辐射计在热带和中纬度地区观测到高温（橙/红色）；而在湿度较高、辐射源自更高高度的区域，则观测到低亮温（绿色）。

NWP模式采用偏微分纳维-斯托克斯方程。由于这些模式模拟的是高度不稳定的大气机理，它们对初始三维廓线的质量极为敏感。这一问题最早由洛伦兹描述，现已被“混沌理论”清晰阐释。运行NWP模式需要最强大的超级计算机支持。

图5-12

AMSU-B全球温度（K）测量合成图



Meteo-05-12

为提高NWP的有效性，全球模式需至少每六小时在全球范围进行一次初始化，全球NWP分辨率需达50公里，区域/本地NWP则需达10公里。未来，有必要获取相关信息，以实现大约每三小时对NWP模式进行一次初始化。

微波探测仪的观测在监测长期气候变化中也发挥着至关重要的作用。微波探测单元（MSU）、AMSU-A以及先进技术微波探测仪（ATMS）自1978年至今，利用相近的通道频率提供了连续的大气温度观测。科学家们将这三代微波探测仪的观测数据进行融合，构建了从对流层下层至平流层上层的基于通道的大气层温度长期气候数据集。凭借其全球覆盖的独特优势，这些气候数据集被广泛应用于卫星时代的气候变化评估。它们提供了对流层变暖速率和平流层冷却速率的定量估计。随着微波探测仪观测序列的不断延长，这些气候数据集正成为研究全球气候变化和验证气候模式模拟结果的重要基础数据。这对于建立对气候模式模拟结果的信心，进而利用其预测未来气候变化，是至关重要的一步。

5.2.7.4 在60 GHz频段工作的天底指向无源传感器特性

大多数专为测量对流层/平流层参数设计的无源微波传感器均为天底指向仪器。它们采用在包含天底方向且垂直于卫星速度的平面内进行跨轨机械扫描（当前技术）或推扫扫描（未来技术）的构型。这种构型可提供最佳的视场（FOV）和数据平均质量。表5-2列出了搭载于低地球轨道卫星、工作在60 GHz频段附近的典型测温仪特性。

表5-2

60 GHz频段微波垂直探测仪典型特性

特性	机械扫描（当前）	推扫扫描（未来）
通道带宽（MHz）	400	15
积分时间（s）	0.2	2.45
天线直径（cm）	15	45
3 dB点瞬时视场（度）	3.3	1.1
跨轨视场（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
刈幅宽度（km）	2 300	2 300
天底像元尺寸（km）	49	16
每行/像元数	30	90

5.2.7.5 无源微波临边探测仪

微波临边探测仪（MLS）沿与大气层面相切的方向观测大气，用于研究可能对地球气候产生重大影响的中低层至高层大气区域，这些区域光化学活动剧烈。临边切向发射测量的主要特点如下：

- 采用最长路径，最大限度地增强低浓度大气微量成分的探测信号，使高空探测成为可能；
- 垂直分辨率由大气辐射传输过程和天线的垂直视场共同决定。典型示例如图5-13所示；
- 垂直于视线方向的水平分辨率主要取决于天线的水平视场以及卫星运动造成的像移模糊；
- 沿视线方向的水平分辨率主要由大气辐射传输过程决定；
- 太空背景为发射测量校准提供了最佳条件；
- 临边测量极易受星间链路干扰的影响。

微波临边探测仪于1991年首次发射升空，主要执行以下功能：

- 在两个侧视正交方向上，对15-120公里高度范围的大气进行垂直扫描；
- 廓线测量的典型垂直分辨率（权重函数在半高处的宽度）约为3至6公里，如图5-13所示；
- 典型水平分辨率为垂直视线方向30公里，沿观测方向300公里；
- 在50秒内获取完整的廓线数据；
- 在五个微波频谱区域观测热临边发射（见表5-3）。

图5-13

微波临边探测垂直权重函数（基于600公里高度、1.6米天线）

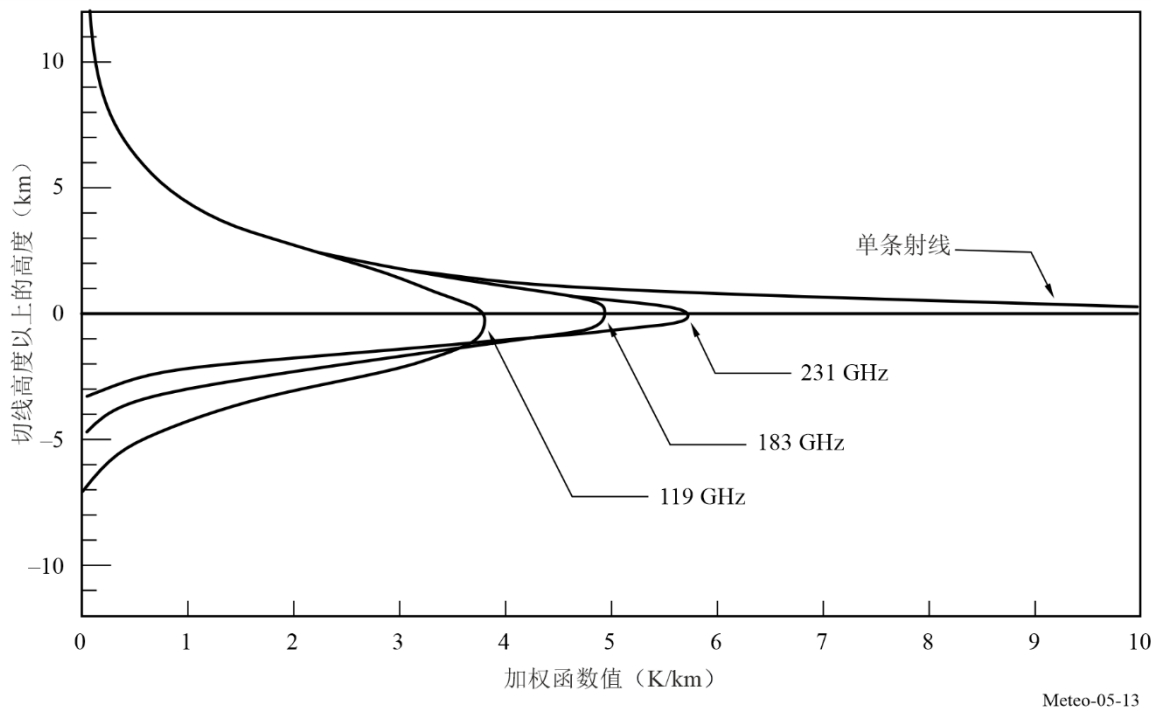


表5-3

典型微波临边探测仪测量目标示例及频谱区域

地球物理参数	频谱区域 (GHz)	高度 (km)	均方根噪声 (积分时间)
大气压	50-60	3 070	1% (2 s)
风速	119	70 110	2-10 m/s (10 s)
温度		20 100	0.53 K (2 s)
O ₂		80 120	3×10^{-3} v/v (2 s)
磁场		80 110	0.3-1 m Gauss (10 s)
H ₂ O	183	1 590	1×10^{-7} v/v (2 s)
ClO	205	2 040	2×10^{-10} v/v (10 s)
O ₃		1 590	1×10^{-8} v/v (2 s)
H ₂ O ₂		2 050	9×10^{-10} v/v (10 s)
O ₃	231	1 590	1×10^{-8} v/v (2 s)
CO		15 100	1×10^{-7} v/v (10 s)

新一代微波临边探测仪测量平流层下层的温度以及H₂O、O₃、ClO、BrO、HCl、OH、HO₂、HNO₃、HCN和N₂O的浓度，以研究这些物质对臭氧消耗、温室气体转化及气候变化辐射强迫的影响并进行诊断。MLS还测量对流层上层的H₂O、O₃、CO和HCN，以研究其对气候变化辐射强迫的影响，并诊断对流层与平流层之间的交换过程。

微波临边探测仪通过测量破坏臭氧的化学循环中众多的自由基、储存物质和源气体，详细观测臭氧化学过程。这套测量数据将为验证人类对全球平流层化学的认知提供有力检验，有助于解释观测到的臭氧变化趋势，并可对该区域化学过程的任何变化提供预警。

早期的微波临边探测仪已证明具备测量对流层上层水汽廓线的能力。这一认知对于理解气候变率和全球变暖至关重要，而此前在全球尺度上进行可靠观测极为困难。

未来的微波临边探测仪可能会在其它频率上观测更多的大气化学成分和物种。

5.2.7.6 无源微波探测仪易受干扰性

无源传感器对所有自然（有用）和人为（无用）辐射进行积分。通常，传感器无法区分这两类信号，因为大气是一种高度不稳定的介质，其特性在空间和时间上均快速变化。无源传感器面临的一个特殊问题是其测量区域内存在大量低功率发射机。这类低功率发射机包括超宽带（UWB）设备、工业、科研和医疗（ISM）应用以及短距离设备（SRD）。随着此类地面有源设备密度的增加，情况日趋严峻，且已有有害干扰实例的报告。

因此，无源传感器测量极易受干扰影响，即使干扰功率电平极低，也可能导致极其严重的不良后果：

- 研究表明，卫星数据中受污染的样本即使仅占0.1%，也足以在数值天气预报中产生不可接受的误差，从而破坏对这些独特的全天候无源测量结果的信任。
- 若（在可检测的前提下）系统性地删除可能存在干扰的数据，可能导致错过快速形成的潜在危险风暴的关键迹象，并使识别新生天气系统成为不可能。
- 如果干扰功率电平低至无法被检测（这极有可能发生），被篡改的数据将被误认为有效数据，基于这些被篡改数据分析得出的结论将存在严重缺陷。
- 对于气候学研究，特别是“全球变化”监测，干扰可能导致对气候信号的误读。

建议书ITU-R RS.2017规定了所需的辐射性能以及满足该性能所允许的干扰电平。

5.2.8 冷空校准

为校准其测量值，地球探测卫星业务（无源）仪器需要已知的热目标和冷目标。热负载通常集成在仪器内部。对于冷负载，仪器则对外层空间进行测量，即指向不包含地球（或其他近地天体，如太阳或月球）的天空区域。

对外层空间的测量方式取决于EESS（无源）传感器的类型：

- 推扫传感器通过旋转使整星指向外层空间；
- 跨轨扫描传感器将扫描周期的特定部分用于观测冷空，典型情况为离天底角约90度；
- 圆锥扫描传感器进行冷校准测量时，要么旋转整星使部分扫描路径指向地球以外，要么在圆锥扫描的部分时段使用不同的反射面；
- 天底指向传感器有时使用指向外层空间的独立馈源喇叭进行冷空校准测量；在其他情况下，则通过旋转整星指向外层空间。

以下以GCOM-W卫星搭载的AMSR2仪器为例，详细描述其冷空校准与高温校准流程。

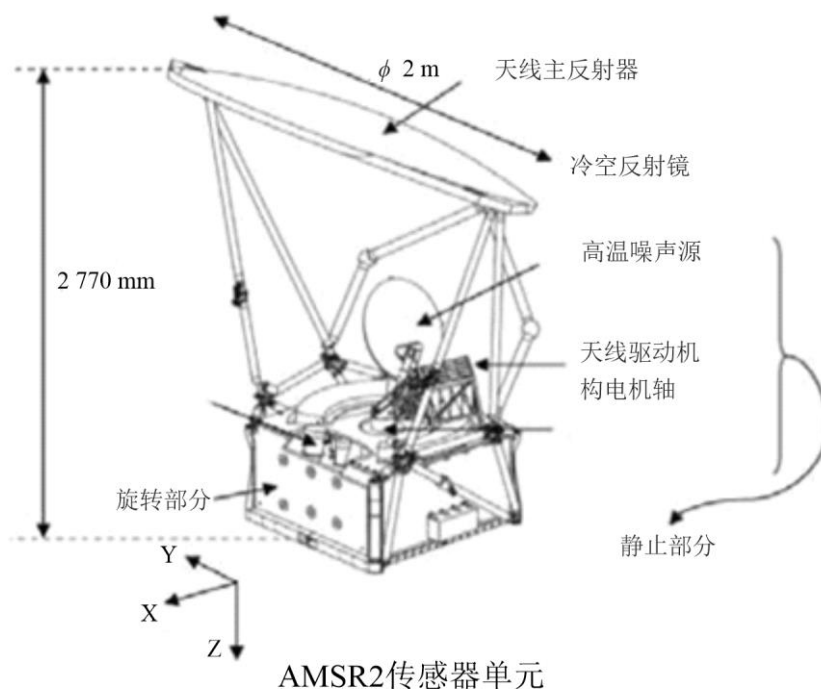
AMSR2由一个传感器单元（见图5-14）— 本质上是旋转扫描仪 — 以及一个固定控制单元和由卫星任务底盘承载的动量轮系统组成。在一次旋转中，传感器在以飞行方向为中心、 $\pm 75^\circ$ 度（性能保证范围为 $\pm 61^\circ$ 度）的范围内采集地表观测数据，并在所有其他角度采集校准数据（来自高温噪声源和冷空反射镜）。

AMSR2在每个1.5秒的扫描周期内采集低温和高温校准数据，用于校正接收机增益波动。

高温噪声源是一个温度控制在约300 K的微波吸收体（称为高温噪声源，HTS），冷空反射镜（CSM）是一个指向深空（约2.7 K）的反射面。从这两项测量获得的数据用于两点校准。扫描旋转速度必须保持恒定，以便在正确的旋转角度依次采集低温校准数据、地表观测数据和高温校准数据。

图5-14

AMSR2外观示意图



Meteo-05-14

然而，由于在深空背景辐射之外还接收到其他辐射，冷空观测期间测得的亮温会高于2.7 K的标称值。影响低温校准亮温的误差因素很多：地球辐射、月球辐射、来自静止卫星的射频干扰、太阳污染、卫星结构自身的辐射以及投射在主反射面上的地球辐射。其中最主要的是地球辐射、月球辐射、射频干扰和太阳影响。

此外，高温校准亮温也可能包含误差，这源于HTS的不均匀性或其与铂电阻传感器测量温度之间的差异。

在计算辐射数据的处理流程中会校正这些误差。

1) 识别并平均等增益/偏置点

识别在低温度和高温校正数据在相同自动增益控制（AGC）电平（增益和偏置）下获得的区间，并对相同增益电平下获得的校准数据进行平均。不同增益和偏置下获得的数据不进行平均。

2) 校正高温噪声源/冷空反射镜

对高温噪声源的温度和冷空反射镜的计数进行如下校正。

- a) 校正高温噪声源的温度（使用校正算法）。
 - b) 校正冷空反射镜的温度（消除月球、地球发射、射频干扰和太阳光的影响）。
- ## 3) 计算所有频率的天线温度转换系数

计算一阶校准方程系数（ A, B ），用于将观测计数值（ C_{obs} ）转换为天线温度（ T_A ）

$$T_A = A \times C_{obs} + B \quad (5-4)$$

需注意的是，虽然此流程可校正已知误差源（如太阳的位置和强度是已知的），但它无法校正干扰的影响，因为干扰通常是动态的且未知的。

5.3 有源传感器

5.3.1 引言

本节旨在阐述星载有源传感器，特别是用于气象现象监测的传感器的无线电频谱需求。其目的是介绍各类独特传感器及其决定其特定频率需求的特性；提出与相关频段内其他业务开展兼容性研究所需的性能与干扰准则；并阐述星载有源传感器与其他业务当前兼容性研究的现状，以及相关议题或关切。

本手册涉及六种关键的有源星载传感器类型：

类型1：合成孔径雷达（SAR）－传感器侧视天底航迹，采集相干雷达回波的相位与时间历程，据此通常可生成地球表面雷达图像。

类型2：高度计－传感器指向天底，测量发射事件与接收事件之间的精确时间差，以提取地球海洋表面（包括沿海和内陆水域）的精确高度。

类型3：散射计－传感器以不同方位角侧视天底航迹，利用回波功率随方位角的变化测量，确定地球海洋表面（包括沿海和内陆水域）的风向与风速。后向散射亦用于观测所有陆地表面，提供土壤湿度、陆地降雨等地表状况信息。

类型4：降水雷达－传感器垂直于天底航迹扫描，测量来自降雨的雷达回波，以确定地球表面的降雨率及降雨的三维结构。

类型5：云廓线雷达－传感器指向天底，测量来自云层的雷达回波，以确定地球表面上空的云反射率廓线。

类型6：雷达探测仪－传感器指向天底，采用较低的中心频率，用于探地雷达（GPR）应用，测量来自地球表面及地下的雷达回波，以识别和表征地下特征，如含水层和冰盖。

上述六种关键有源星载传感器的特性总结于表5-4。

表5-4

有源星载传感器特性

传感器类型						
特性	SARs	高度计	散射计	降水雷达	云廓线雷达	雷达探测仪
观测几何	侧视，离天底角10°-55°	天底指向 多入射角观测	– 方位向三/六波束 – 一个或多个圆锥扫描波束	垂直于天底航迹扫描-	天底指向	天底指向
足迹/动态	– 固定于单侧 – ScanSAR 模式 – 聚束模式	固定于天底 多入射角观测	– 方位向固定 – 多波束圆锥扫描	垂直于天底航迹扫描	固定于天底	固定于天底
天线波束	扇形波束	笔形波束	– 扇形波束 – 笔形波束	笔形波束	笔形波束	宽波束
辐射峰值功率（W）	1 500-8 000	20	100-5 000	600	1 000-1 500	100
波形	线性调频脉冲	线性调频脉冲	断续CW或短脉冲（海洋）或线性FM脉冲（陆地）	短脉冲	短脉冲	线性FM脉冲
带宽	20-1 200 MHz	320/500 MHz	5-80 kHz（海洋）或1-4 MHz（陆地）	14 MHz	300 kHz	10 MHz
占空比（%）	1-30	46	31（海洋）或10（陆地）	0.9	1-14	10.2
服务区域	陆地 / 沿海 / 海洋	海洋/冰/沿海/内陆水域	海洋/冰/陆地/沿海	陆地/海洋	陆地/海洋	冰盖/沙漠
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	45 MHz

5.3.2 合成孔径雷达（SAR）

合成孔径雷达用于获取地球表面的雷达图像。射频中心频率的选择取决于地球表面与电磁场的相互作用特性。射频带宽则影响图像的分辨率。图5-15 a) 展示了线性调频脉冲，其下方的曲线显示了相应的射频带宽。距离分辨率等于 $c/2(BW \sin q)$ ，其中 c 为光速， BW 为射频带宽， q 为入射角。例如，要在30°入射角下获得1米的距离分辨率，射频带宽应达到300 MHz。如图5-15 b) 所示，许多SAR向速度矢量的一侧刈幅进行照射。照射刈幅内的任何干扰源产生的信号都会被SAR接收机接收，从而降低图像像元的品质。可允许的图像像元质量降级程度决定了可容忍的干扰电平。图5-16展示了拍摄于挪威斯瓦尔巴群岛的SAR图像。

图5-15

线性调频频谱与SAR照射刈幅

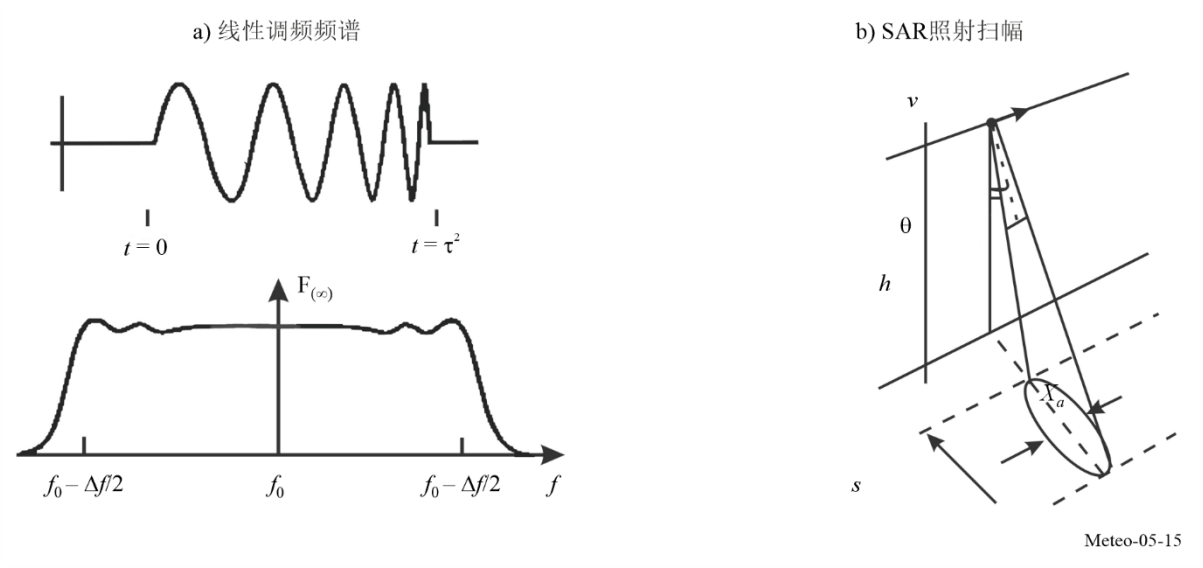


图5-16

挪威斯瓦尔巴群岛SAR图像



Meteo-05-16

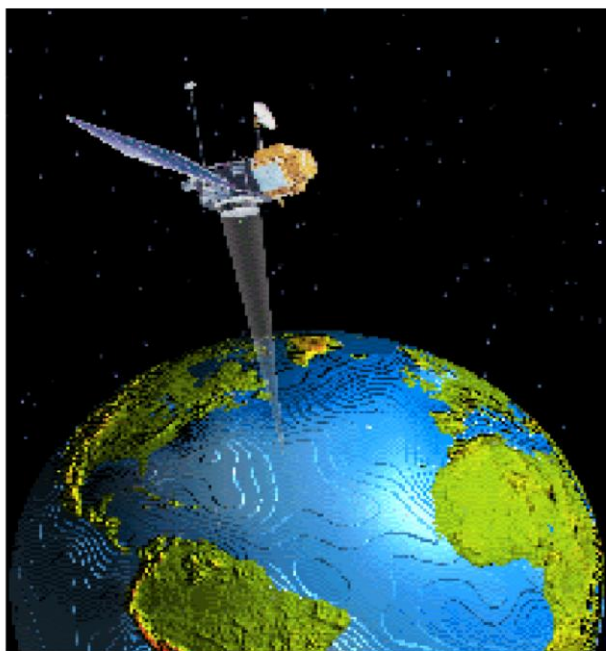
5.3.3 高度计

高度计用于测量地球表面的高度，通常应用于海洋区域。图5-17和图5-18分别展示了卫星高度计及其典型测量精度。射频中心频率的选择取决于海面与电磁场的相互作用特性。双频工作模式可用于补偿电离层延迟。例如，采用约13.6 GHz和5.3 GHz的频率组合即是一种可行的双频配置。较宽的射频带宽有助于提高测高精度。时间差测量精度 Δt 与带宽BW成反比。可允许的高程精度降级程度决定了可容忍的干扰电平。部分卫星高度计已能将海洋地形测量精度提升至优于2厘米。建议书ITU-R RS.1166规定的可允许性能降级为4%。

高度计通常配备一台指向相同方向的辅助辐射计。此举旨在同步测量大气水汽含量，以修正信号往返传播的时间延迟。

图5-17

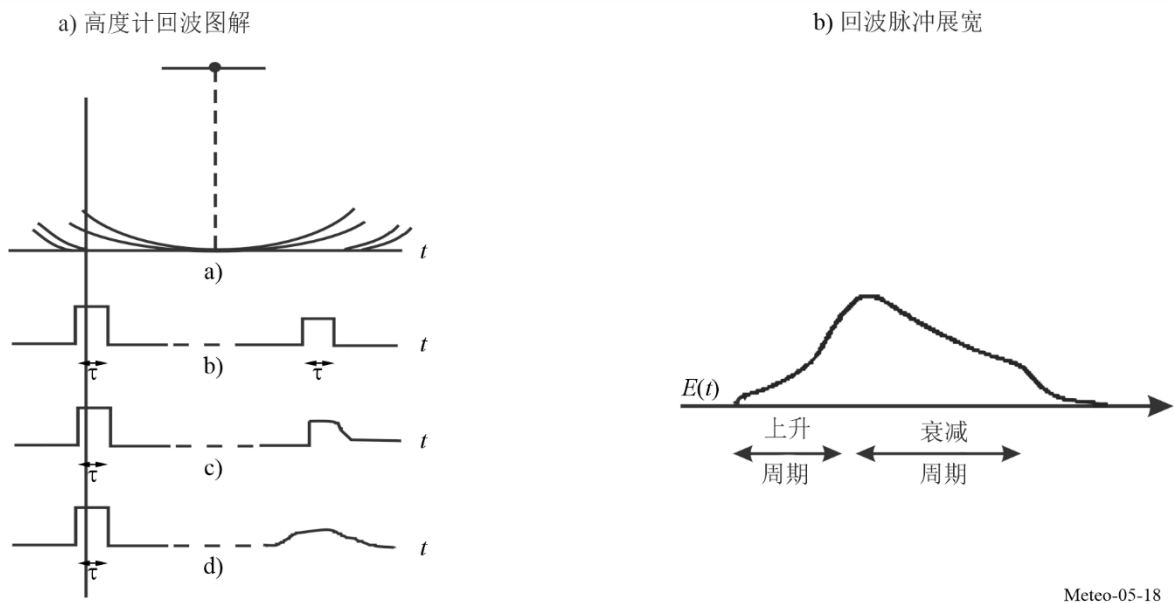
微波卫星高度计



Meteo-05-17

图5-18

高度计回波及其脉冲展宽示意图

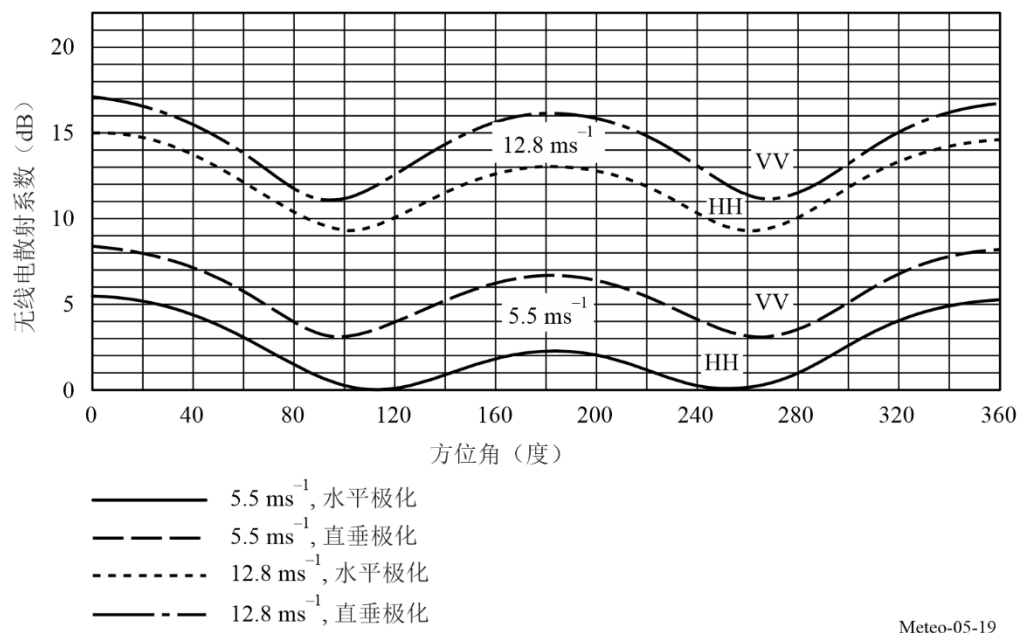


5.3.4 散射计

散射计主要用于测量地球海洋表面的风向、风速以及海冰的范围与特征。射频中心频率的选择取决于海面与电磁场的相互作用及其随方位角的变化特性。图5-19展示了后向散射强度相对于风速矢量方向随方位角的变化规律。

图5-19

后向散射系数随方位角的变化



如图5-20所示，典型散射计以多个不同的固定方位角对地球表面进行照射。图5-21展示了一台采用笔形波束扫描的散射计，它以两个不同的离天底视角进行扫描，并在方位向上绕天底进行360度旋转。较窄的射频信号带宽确保了所需的测量单元分辨率。

图5-20

散射计固定足迹示意图

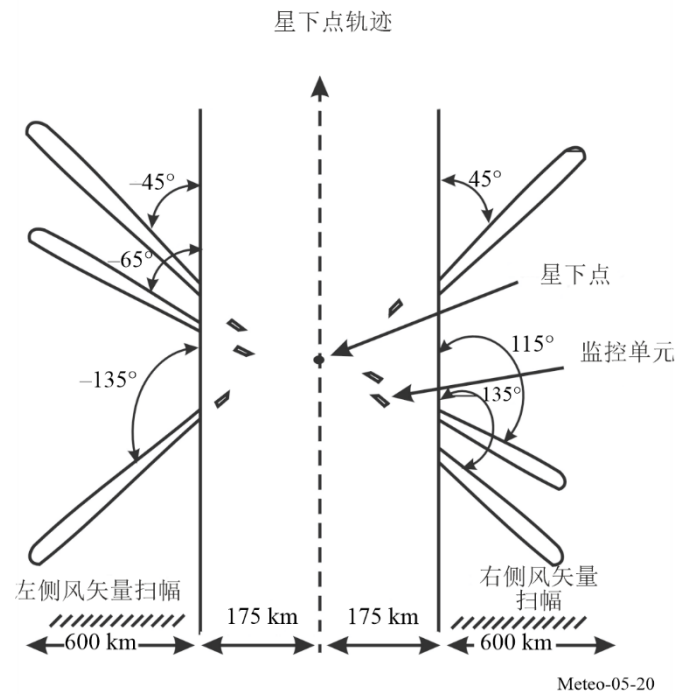
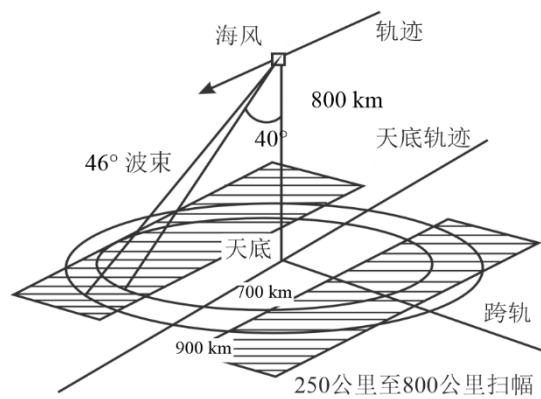


图5-21

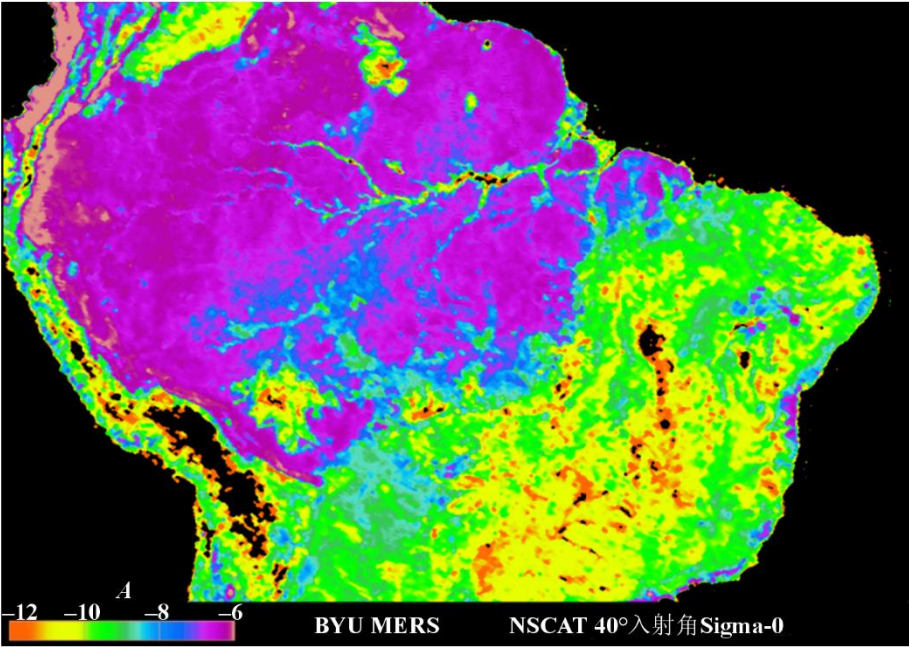
散射计笔形波束扫描示意图



散射计的主要功能是研究海洋风场，但科学家也开发了一种方法，通过分析仪器雷达后向散射的变化来监测所有陆地表面，从而提供土壤湿度、陆地降雨等地表状况信息。图5-22展示了由NSCAT散射计拍摄的南美洲亚马逊雨林雷达图像。该散射计的雷达对地表状况（如植被类型和密度）非常敏感。

图5-22

NSCAT散射计拍摄的南美洲亚马逊雨林雷达图像



5.3.5 降水雷达

降水雷达用于测量地球表面的降水率，通常重点关注热带地区的降雨。

射频中心频率的选择取决于降水粒子与EM场的相互作用特性。球形水成物的后向散射截面公式为：

$$\sigma_b = \pi^5 |K_W|^2 D^6 / \lambda^4 = \pi^5 |K_W|^2 Z / \lambda^4 \tag{5-5}$$

式中：

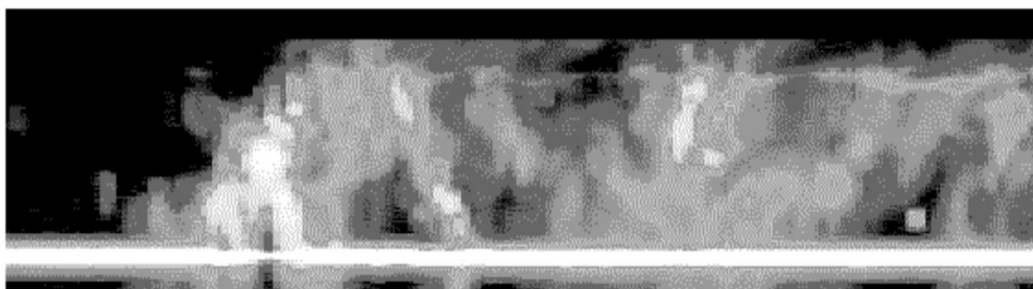
- $|K_W|^2$ ：与雨滴水的折射率相关
- D ：雨滴直径（m）
- λ ：雷达波长（m）
- Z ：雷达反射率因子

后向散射强度随射频频率的四次方增加。

图5-23展示了一个雷达反射率因子垂直剖面的示例。较窄的射频信号脉冲宽度提供了所需的测量距离分辨率。某型降水雷达采用1.6 μs的脉冲宽度，但该数值可能因系统而异。可允许的最低降水反射率降级程度决定了可容忍的干扰电平。

图5-23

基于降水反射率测量合成的反射率图



Meteo-05-23

5.3.6 云廓线雷达

云廓线雷达用于获取地球表面上空云反射率的三维廓线。图5-24展示了典型的后向散射反射率随高度变化的示例。

射频中心频率的选择取决于海面与电磁场的相互作用及其随方位角的变化特性。

公式（5-6）给出了计算云层回波功率水平的表达式：

$$\tilde{P} = \frac{\pi^5 10^{-17} P_r G^2 t \theta_r^2 |K_W|^2 Z_r}{6.75 \times 10^{14} (\ln 2) r_0^2 \lambda^2 l_r} \quad \text{mW} \quad (5-6)$$

式中：

$\tilde{P}$: 云层回波功率水平 (mW)

P_r : 雷达发射功率 (W)

G : 天线增益 (数值)

t : 脉冲宽度 (μs)

θ_r : 天线3 dB波束宽度 (度)

K_W : 云水含量的介电因子

Z_r : 云反射率因子 (mm^6/m^3)

r_0 : 距离 (km)

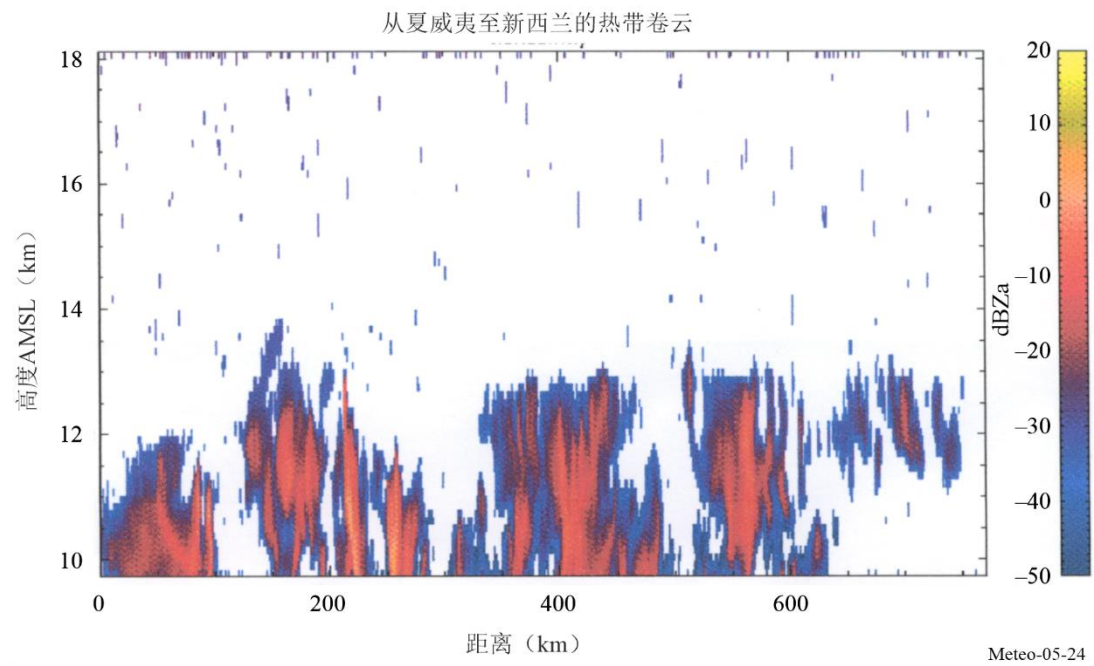
λ : 雷达波长 (cm)

l : 大气吸收导致的信号损耗

l_r : 雷达系统损耗

如该式所示，回波功率随波长的平方衰减。由于频率与波长成反比，回波功率随射频频率的平方增加。对于小粒子（瑞利区），回波功率随频率的四次方增加，因为该比率取决于粒子尺寸相对于波长的比值。云廓线雷达天线具有极低的旁瓣，以将云层回波与旁瓣照射产生的强地表回波隔离开来。

图5-24
卷云反射率示例图

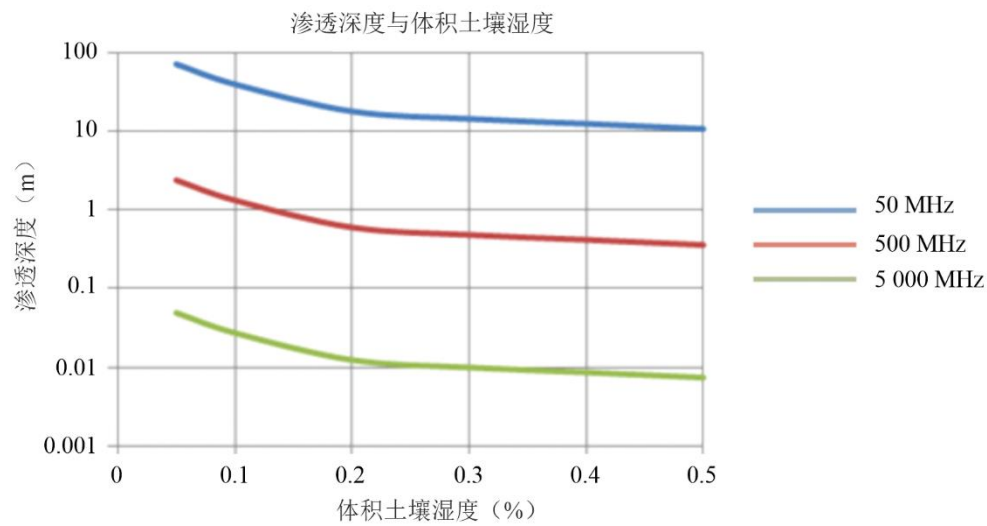


5.3.7 雷达探测仪

雷达探测仪属于探地雷达（GPR）系统，与其他类型的有源传感器相比，其采用较低的射频中心频率，以穿透地球表面。该系统可生成地下散射层的雷达图像，用于定位和表征地下水体与冰层沉积。

如图5-25所示，雷达探测仪所能达到的穿透深度取决于土壤湿度与频率。

图5-25
地表穿透深度

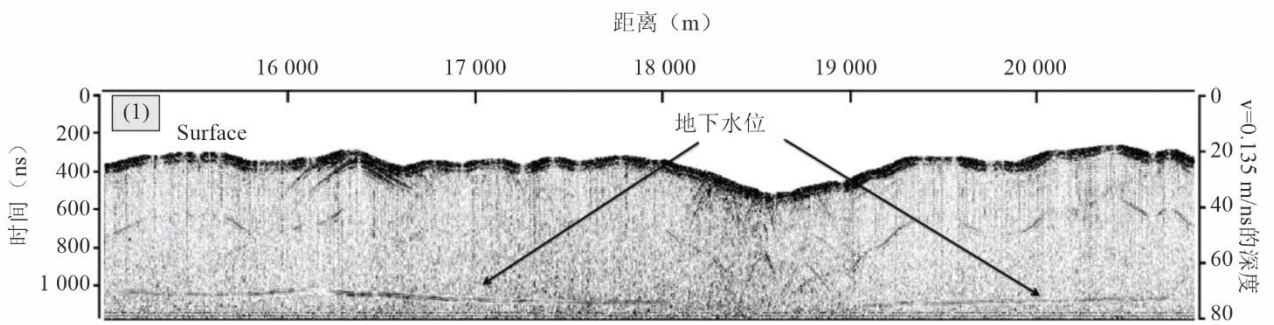


鉴于穿透深度随波长增加而增大，雷达探测仪需在低频段工作。同时，由于需要干燥的环境条件，此类雷达仅能在干燥的冰盖区或沙漠地带运行。

具体而言，雷达探测仪拟使用的40-50 MHz频段是穿透深度与分辨率之间的权衡选择。该频段既可用于详细绘制干旱地区浅层含水层（深度约10-100米）的空间分布图，也可用于测绘基底界面地形并测定冰盖厚度（约5公里量级）。

图5-26展示了一幅以水平距离对时间（或深度）绘制的二维剖面图，称为雷达图，数据来源于2011年在科威特某含水层开展的机载甚高频（VHF）雷达探测活动。该图突显了地下水位深度在49米至52米之间的变化。

图5-26
2011年科威特含水层机载VHF雷达探测活动所获雷达图



Meteo 05-26

5.3.8 传感器干扰与性能准则

关于各类星载有源传感器的性能指标及可允许干扰电平的准则，详见建议书ITU-R RS.1166。该建议书会定期修订，以反映监管规定的变更（如新的地球探测卫星业务（有源）划分），以及传感器技术最新发展对现有性能与干扰准则的影响。

5.3.9 功率通量密度（pfd）电平

表5-4所列各类星载有源传感器的特性表明，其发射峰值功率及在地表接收到的功率电平存在显著差异。表5-5展示了部分典型传感器配置在地表产生的有源传感器功率通量密度电平。

表5-5
地表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	探测仪
辐射功率（W）	1 500	20	100	578	630	100
天线增益（dB）	36.4	43.3	34	47.7	63.4	10
天线增益（dB）	695	1344	1 145	350	400	400
pfd（dB（W/m ² ））	-59.67	-77.25	-78.17	-46.55	-31.64	-93.03

第6章

空间天气

6.1 空间天气定义及其相关无线电通信业务

WRC-23批准了空间天气的如下定义：

空间天气：主要指源于太阳活动、发生在地球大气主要部分之外的自然现象，其对地球环境及人类活动产生影响。

《无线电规则》第**29B.1**条界定了与空间天气观测相关的无线电业务：“空间天气传感器可在气象辅助业务的子集－气象辅助（空间天气）划分下运行。”

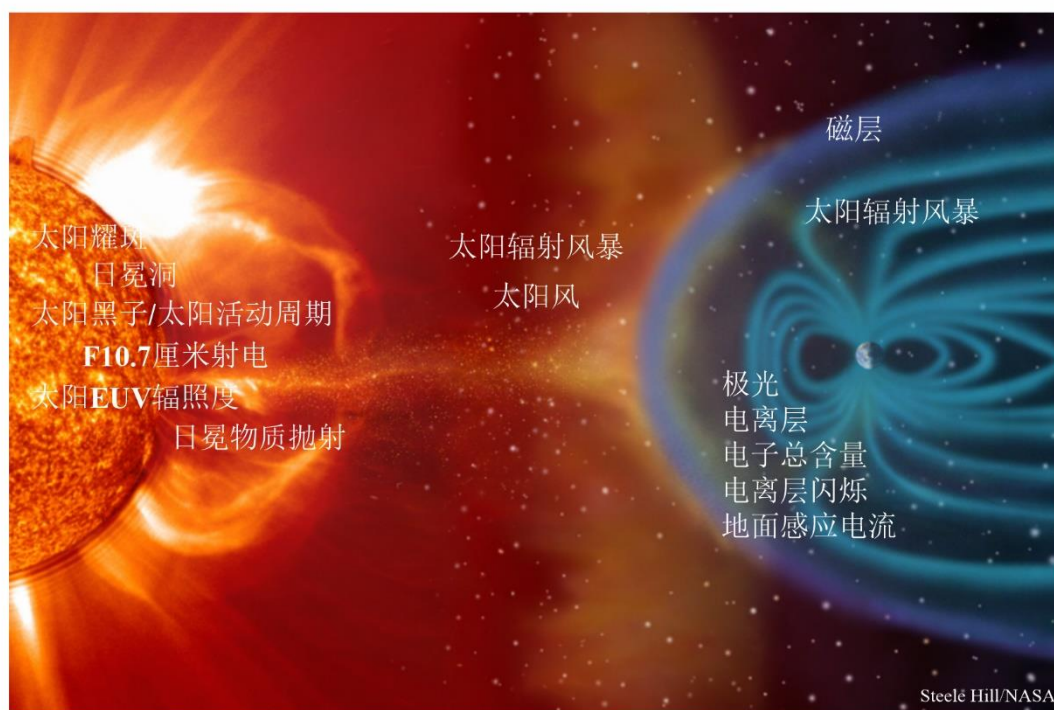
6.2 空间天气观测

6.2.1 观测现象

如图6-1所示，空间天气涉及多种物理现象。这些现象包括地磁暴与亚暴、范艾伦辐射带粒子加速、极光、电离层扰动、星地无线电信号闪烁、远程雷达信号异常，以及地表地磁感应电流。日冕物质抛射及其相关激波、太阳高能粒子、高速太阳风流以及太阳耀斑是驱动空间天气现象的重要因素。

图6-1

空间天气现象



6.2.2 空间天气观测需求

开展空间天气观测旨在：

- 监测和预报空间天气扰动的发生与概率（包括监测与上述空间天气诱发扰动相关的太阳活动特征）；
- 在扰动超过阈值时发布灾害警报；
- 指导空基系统（即卫星及航天员安全规程）与地基系统（即电网防护与空中交通管理）的设计；
- 保障能源基础设施、运输系统及通信基础设施（包括全球导航卫星系统（GNSS）及关键基础设施）的安全可靠运行，因其对人类安全与福祉具有潜在影响；
- 为开发和验证空间天气条件数值模式提供输入数据；
- 开展科学研究，以增进对太阳及其活动如何影响地球外层大气的认知；
- 为移动业务（含国际移动通信（IMT））提供所需的持续监测、临近预报及预测信息。

6.2.3 利用无线电频谱的空间天气传感器系统

全球各类机构提供业务化的空间天气产品与服务，部分机构已整合为全球观测网络。支撑空间天气观测的产品与服务可归纳为四大类：太阳与行星际（太阳风）、高能粒子、地磁及电离层。

在上述各类别中，观测数据源自地基与天基仪器的协同工作。高能粒子与地磁场的测量通常采用原位探测方式：在太空、大气层中及地面进行。其探测方法不直接利用无线电信号，故本章不再赘述。

其余利用无线电波发射与传播进行测量的遥感仪器，既包括无源（仅接收）系统，也包括有源（发射并接收）系统。

许多仅接收型传感器系统利用机会信号开展工作（包括人造信号如GNSS信号，或自然起源信号如宇宙射电源）。而有源（发射并接收）传感器系统则通过无线电信号的传播来探测电离层状态。

6.2.3.1 太阳观测

太阳射电辐射由地基射频频谱仪、成像仪及单频太阳射电流量监测仪进行观测。射电观测主要通过以下方式实现：

- 1) 在选定频率上观测全日面的单天线系统；
- 2) 在宽频范围内观测全日面的频谱仪；
- 3) 基于孔径合成（干涉测量）技术的成像仪或射电日像仪，可提供太阳活动的二维分布图。

太阳射电天文台遍布全球，能够提供7×24小时的太阳射电辐射连续监测。

6.2.3.1.1 太阳射电流量

通过观测不同频率的太阳微波辐射，可研究各类高能太阳过程及其对地球热层的影响（包括太阳极端紫外（EUV）辐射、紫外波段低能区的太阳活动，如谱斑、光斑及高温日冕环）。这些多样化的观测对于可靠、稳定地评估热层特性（例如其密度或电离度）至关重要。

6.2.3.1.2 太阳射电频谱仪

太阳射电频谱仪通常扫描从数十MHz至数GHz的频率范围。它们特别适用于观测太阳射电爆发——这是耀斑、日冕物质抛射及其他太阳现象的重要指标，并可用于推断太阳风中激波及喷发等离子体的速度。此类观测要求明确的观测频次为0.1至60秒（尽管60秒的长间隔对射电爆发观测意义有限），数据可用延迟为1至约30分钟。

6.2.3.1.3 射电日像仪

太阳射电日像仪利用孔径合成技术快速绘制二维太阳射电流量分布图。大多数太阳射电日像仪还能同时覆盖多个频率。

6.2.3.2 日球层观测

日球层观测旨在理解太阳大气与太阳活动，涵盖从太阳磁场的生成与浮现，到太阳风的诞生以及太阳高能粒子的加速过程。

6.2.3.2.1 行星际闪烁（IPS）

行星际闪烁是指遥远致密射电源发出的无线电波在穿过太阳风（尤其是太阳附近）中受扰动的等离子体密度区域时，其强度发生的起伏变化。太阳风的扰动程度（或太阳风密度本身）可根据闪烁幅度进行估算。太阳风速度则可通过单台IPS站获取的闪烁频谱推导，或利用多台分立IPS站获得的闪烁图样间的时间延迟来计算。大多数利用IPS的观测系统均在单一频率下工作。

6.2.3.3 电离层观测

电离层观测旨在理解电离层变率，该变率与太阳活动、地球磁层及中性大气密切相关。此类观测对于预判其对现代技术的影响不可或缺。

6.2.3.3.1 电离层测高仪

电离层测高仪向电离层发射扫频无线电信号（脉冲式或连续波（CW-chirp））。当无线电频率等于当地等离子体频率（与电子密度平方根成正比）时，信号发生反射。因此，从各电离层反射回来的峰值频率可直接反映电子浓度。相反，各电离层高度则是根据无线电信号的传播时延（假设在自由空间中传播）估算得出。由于等离子体频率（电子密度）随高度变化，且受地球物理条件影响随时间变化，电离层测高仪必须覆盖较宽的频率范围（例如约0.5至15 MHz）。其高度覆盖受限于电离层峰值截止频率。高于当地等离子体频率的频率可用于最高达30 MHz的斜向探测。现代研究型电离层测高仪还能测量其他参数，最显著的是等离子体速度和重力波谱。

6.2.3.3.2 非相干散射雷达

非相干散射雷达（ISR）是一种用于精确测量热电离层等离子体的雷达技术。该技术探测来自热等离子体离子声波和朗缪尔模共振振荡的极微弱散射。主要测量参数包括电子密度、电子温度、离子温度及电离层漂移速度。在特定条件下，还可获得多种衍生产品，包括电场、中性风及离子成分。测量具有空间分辨能力，可覆盖电离层峰值高度之上及之下区域。虽然ISR能非常精确地测定电离层各层高度，但由于电子浓度是从总回波功率推算得出，因此需要与电离层测高仪交叉定标或利用ISR频谱中的特定特征来标定电子浓度。通过移动雷达天线面或调整天线阵列的相位，可获得电离度水平分布的估算值。结合来自不同天线或不同波束方向的数据，可计算出矢量速度。

此类雷达在每次发射脉冲后切换多个波束，在典型的15至60秒积分周期内，每个波束会被多次访问。来自多波束的数据可生成电离层电子密度、电子温度、离子温度及视线速度的立体图像。来自多个波束的视线速度数据可进一步合成，用于估算E区矢量电场及中性风。

ISR向电离层发射大功率甚高频（VHF）或特高频（UHF）无线电脉冲。现有系统通常采用典型的HF/VHF/UHF/L波段中心频率，接收带宽可达30 MHz，发射带宽通常达1 MHz。未来系统计划将发射带宽提升至10 MHz。由于热电离层等离子体的雷达散射截面极弱，系统需要极高的发射功率，多数系统属于兆瓦级，天线口径在25至300米之间。早期系统通常基于单一天线（抛物面反射面），而现代系统则多采用相控阵雷达天线设计。

6.2.3.3.3 相干散射雷达

此类雷达系统测量由等离子体不稳定性、波动和结构引起的电离层不规则体产生的相干散射，从而确定回波功率和视线速度。结合两个或多个雷达站的数据，可计算出矢量速度。相干散射雷达常设计为可移动系统，便于部署以研究电离层不同区域。典型专用系统工作频率为30 MHz、50 MHz或144 MHz，带宽约为1 MHz。

6.2.3.3.4 其他雷达

HF多普勒雷达系统由连续波（CW）无线电发射机、数台高频率稳定度的接收机及记录设备组成。CW信号通常在3至10 MHz频率发射。当无线电波从电离层反射时，反射点的运动将导致信号相位路径发生变化，从而产生与路径时间变化率成正比的多普勒频移。HF多普勒测量可用于研究电离层扰动，如大气重力波、行进式电离层扰动、偶发E层与扩展F层现象，以及磁脉动超低频频波（如Pi2脉动）。理解行进式电离层扰动和大气重力波特征对空间天气监测至关重要，因为这些现象引发的电离层闪烁传播特性，有助于对空间天气对无线电通信及GNSS依赖型应用的影响进行短时预报。

中间层/低热层动力学雷达通过部分反射观测（常结合法拉第旋转技术）测量中间层区域。中间层是大气的关键层次，常通过流星雷达和中频雷达进行重点观测。这些对中间层/低热层的雷达测量已广泛用于探测平均风与潮汐，并深入揭示该区域环流的季节变化、年际变化及长期行为（包括长期趋势）。

6.2.3.3.5 电离层断层扫描

电离层断层扫描是一种分析二维或三维电子密度的技术。该方法基于地基测量LEO卫星发射的150 MHz和400 MHz双频信号。双频无线电接收机测量卫星发射信号的相位差。断层分析需要多台接收机协同工作。根据所用算法，来自其他仪器（如GNSS接收机）的电子密度测量数据也可纳入使用。

6.2.3.3.6 射电望远镜

射电望远镜不仅可用于观测太阳和太阳风，也可用于研究电离层。宽带观测能识别电离层闪烁，从而改进对中纬电离层的监测。

6.2.3.3.7 相对电离层吸收仪

通过测量来自大气层外已知射电源（通常为宇宙射电源）的无线电信号，可利用相对电离层吸收仪绘制低电离层吸收分布图。三种最常见的无线电波吸收类型为：

- 1) 沉降电子引起的极光吸收；
- 2) 与近地环境中 >10 MeV质子相关的极盖吸收；
- 3) 太阳X射线爆发引发的X射线诱导吸收，导致D区（典型高度60-100公里）电子密度异常升高，从而引起突发宇宙噪声吸收。

地基相对电离层吸收仪测量被电离层D区吸收的宇宙背景射电噪声功率。D区吸收是电离程度（电子密度）的函数。为获取过量电离导致的吸收量，需将当日相对电离层吸收仪信号电压与所谓“宁静日曲线”（QDC）进行比较。QDC是在选定的地磁平静日（即无地磁扰动、太阳质子通量为本底水平且无太阳X射线爆发）确定的基准曲线。

相对电离层吸收仪是一种连续波无线电接收机，其接收灵敏度对应于背景天空噪声温度，专用于测量穿越电离层的无线电波吸收。典型配置中，一副双偶极天线指向天顶，在90公里大气高度处形成的波束直径约100公里。大部分时间内，接收的射频电平以银河系起源的射电辐射为主，并随恒星时呈规律性变化，该变化特征可由QDC描述。电离层对无线电波的吸收会使接收电压降至QDC水平以下。

多台相对电离层吸收仪组网可提供近地环境的一般背景信息及大气吸收区域的覆盖范围。

相对电离层吸收仪主要分为三类：

- 宽波束相对电离层吸收仪采用单一天线，工作频率为20.5 MHz、30 MHz、38.2 MHz和51.4 MHz；
- 成像相对电离层吸收仪具有多个窄波束，通常采用相控阵天线，以实现更高的时间和空间分辨率。其工作频率通常与宽波束相对电离层吸收仪相同；
- 频谱相对电离层吸收仪在多个频率上测量宇宙射电噪声，典型频率范围为20至60 MHz。

全球约有50个相对电离层吸收仪站点，其中大部分位于高纬度地区。

6.2.3.3.8 全球导航卫星系统（GNSS）

通过星载或地基接收机跟踪GNSS无线电信号的时间延迟和相移，可测量给定传播路径上的总电子含量（TEC）。随着导航卫星相对于接收机的运动，利用多条可用传播路径上的TEC数据，可确定电离层电子密度的区域和全球分布。用于空间天气观测的相应GNSS接收机以1秒或30秒的时间分辨率，在两个或多个无线电频率上测量幅度、伪距和相位。

基于庞大的全球台站网络及台站分布，可通过假设所有电子均位于350公里或450公里特定高度的薄层内，来确定专用的电离层图。

此外，电离层闪烁通常使用GNSS观测数据进行测量，但需采用增强的采样率（典型值为50-100 Hz）。利用GNSS幅度及相位数据可生成超低噪声闪烁指数。闪烁现象与电离层中小尺度结构的出现有关，而这些结构与空间天气现象密切相关。

由配备GNSS接收机的低地球轨道（LEO）卫星获取的星基无线电掩星（RO）数据，也可用于提供高分辨率的电离层垂直结构信息，包括偶发E层和赤道等离子体泡等扰动的全球信息。这些观测在无法进行地基网络观测的海洋区域尤为重要。星基GNSS RO接收机的测量是获取全球电子密度垂直廓线的少数途径之一。此外，配备GNSS接收机用于定位目的的卫星，其顶部天线采集的双频载波相位观测数据，可提供卫星轨道高度以上电离层及等离子层的积分电子含量信息。

6.2.3.3.9 甚低频（VLF）

为数不多能探测电离层D区的技术之一，是利用被困在低电离层（约85公里）与地球之间的VLF电磁辐射；这些信号可在距离源数千公里处被接收。接收无线电波的性质由地球-电离层波导内的传播决定，其变化性主要源于低电离层及以下区域（即D区）电子密度剖面的变化。在太阳耀斑期间，这些D区电子密度在很大程度上由耀斑本身的软X射线（1-10 keV）驱动。因此，观测到的这些异常间接反映了太阳耀斑的性质。

6.2.4 基于射频的传感器对当前空间天气产品的支持分类

根据WMO和ITU-R开展的研究，特别是提供了特定仪器类型特性信息的ITU-R RS.2456报告，基于当前空间天气观测产品的应用，对利用无线电频谱的空间天气传感器系统进行了非穷尽的分类，如下所示：

- 业务化空间天气应用中使用的系统和频率（用于实时监测、预报模式的近实时初始化）。
- 从研究向业务化过渡的系统和频率。
- 目前未投入业务化应用的研究型系统（例如，数据无法在近实时获取，数据提供存在空白）。

表6-1至表6-3简要汇总了空间天气射频仪器及其分类。本手册中列出的频率仅供参考，不代表也不暗示任何监管规定。

表6-1

第1类 – 业务化应用系统

仪器类型	频率（MHz）	带宽	地点（国家/地区）
太阳射电流流量监测	245, 410, 610, 8 800, 15 400	可变	澳大利亚、意大利、美国
	2 695	可变	澳大利亚、意大利、美国 比利时
	1 415, 4 995	可变	澳大利亚、意大利、美国、 加拿大、比利时、中国
	2 200, 2 300, 2 730, 3 350, 4 542, 4 500, 5 000, 8 000, 9 000, 9 081	10 MHz	中国
	2 800	可变	加拿大、比利时、中国、韩 国、波兰
	1 000	可变	日本、比利时、波兰

表6-1（完）

仪器类型	频率（MHz）	带宽	地点（国家/地区）
频谱仪	30-3 000	2 970 kHz	韩国
	20-650	1 000 kHz	希腊
	70-9 000	8 930 kHz	日本
	232-258, 389-431, 500-18 000	18 000 kHz	韩国
	10-80	70 kHz	法国
	20-80	60 000 kHz	比利时
	45-450	400 MHz （98 kHz频率分辨率）	
	275-1 495	1 220 MHz	
	45.0-870.0	0.08, 0.30, 2.40 MHz	全球
	140-1 000	860 MHz	法国
	25-180	不可用	澳大利亚、意大利、美国
	35 300-36 300 37 300-38 300	500, 1 000 MHz	芬兰
	15-15 000 15 000-40 000	可变	中国
射电日像仪	150-450	0.7 MHz	法国
行星际闪烁（IPS）	327	10 MHz	日本
	10-90; 110-190; 170-230; 210-250	80 MHz	欧洲（LOFAR）、 芬兰（KAIRA）
	139.65	不可用	墨西哥
电离层测高仪	0.5-33.0	42 kHz, 50 kHz, 60 kHz	全球
电离层断层扫描	150	6.0 MHz	芬兰、挪威、瑞典
	400	8.0 MHz	
相对电离层吸收仪	20.5, 30, 32.4, 38.2, 51.4	15, 30, 100, 250 kHz	加拿大、冰岛、阿根廷、澳大利亚、美国、南非、北欧、格陵兰、中国、南极洲、俄罗斯联邦、巴西
	20-60	200, 250 kHz	芬兰
RNSS电离层监测	GPS（L1, L2, L5） 北斗（B1, B2, B3） GLONASS（L1, L2） 伽利略（E1, E5, E6）		全球

表6-2

第2类 – 从研究向业务化过渡的系统

仪器类型	频率 (MHz)	带宽	地点 (国家/地区)
行星际闪烁	10-85	80 MHz	法国
	50-350	300 MHz	澳大利亚
非相干散射雷达	1-20	可变	意大利、阿根廷
	427-453	25 MHz	北欧、北美、日本
相干散射雷达	40.8	18.1-404 kHz	韩国
	0.3-26	10 kHz	全球
中间层/低热层动力学 雷达 (流星雷达)	33.2	18.1 kHz	韩国
	3.17	40 kHz	德国
	2	200 kHz	中国
	35.24	10 MHz	
	39	1 MHz	
	3.18	40 kHz	挪威
用于机会观测的其他仪器类型：			
VLF接收机	0.01-0.5	50 kHz、各种	全球

表6-3

第3类 – 研究型系统

仪器类型	地点 (国家/地区)
太阳射电望远镜	俄罗斯联邦
	芬兰 (MRO-14和MRO-1.8)
射电日像仪	芬兰、日本、美国、俄罗斯联邦、印度
频谱仪	印度、俄罗斯联邦、乌克兰、捷克共和国、瑞士
HF频谱仪	法国 (十米波阵列)、日本
电离层	挪威 (特罗姆瑟)、美国 (阿拉斯加、波多黎各)、 俄罗斯联邦 (瓦西尔斯尔斯克)、德国
电离层测高仪	德国
相干散射雷达	挪威 (MAARSY)

第7章

用于气象及相关环境活动的其他无线电通信系统

7.1 引言

如第1章所述，天气、气候、水文、海洋及相关环境服务须从陆地、海上、空中和太空等许多遥远站点收集观测资料。因此，除前几章所述的气象卫星、气象辅助业务、无线电定位和EESS服务外，WMO全球基础设施还依赖于许多其它的无线电通信业务。本章介绍部分依靠无线电频率开展业务的此类配套系统。

7.2至7.4节介绍用于实地测量系统数据共享及预报数据分发的各系统信息。7.5至7.8节介绍依托无线电频谱开展关于雷击发生地点和时间等特定环境特征测量的观测系统。其中部分系统利用其他无线电频谱业务产生的机会信号来测量大气特征。

NWP模式分辨率不断提升，促使对环境参数实地测量的需求增长，其中许多观测资料如今是通过自动系统提供。无线通信技术能够支撑此类系统在偏远站点运行并传输数据；有些情况下，这些链路还可以实现远程控制与维护，减少人工干预，降低偏远站点运维难度。随着技术持续发展，上述系统目前采用多种无线电通信业务，实现偏远站点与数据处理中心之间的数据共享。

要确保气象信息与警报尽可能短时延分发给终端用户，无论是人口稠密的城区，还是人烟稀少的偏远区域，这一点至关重要。此外，天气、气候、水文、海洋及相关环境服务可为全球海上和航空业务提供支撑，保障这类天气高度敏感行业的安全运行。气象产品分发系统采用各类无线电通信业务为各类终端用户提供保障。

7.2 数据分发系统

如7.1节所述，为保障天气预报的发展，需要更多的实地测量数据，这促使更多地使用自动测量系统。此类系统需要可靠的通信链路实现数据传输以及远程指令控制。这些系统在工作频率等技术特性上差异显著，几乎可以使用任意气象无线电频段；运行方也可选用商用通信链路（例如移动互联网）。通信方案的选择通常取决于所需带宽，而带宽又由传输信息的类型与数据量决定。

天气预报的分发与天气数据的收集和存档同等重要。向公众提供这些预报信息是保障生命的前提，以便人们能够采取必要措施保护自身生命和财产安全。联合国“全民预警”（EW4ALL）倡议旨在通过挽救生命的预警系统，确保全民免受灾害性天气、水或气候事件的影响。该倡议依托四大支柱构建有效且包容的多灾种预警系统。其中，第三个支柱“[预警分发和传播](#)”由国际电信联盟（ITU）牵头，重点关注“最后一公里”连通，确保预警及时触达面临风险的民众，使其能够采取应对行动。

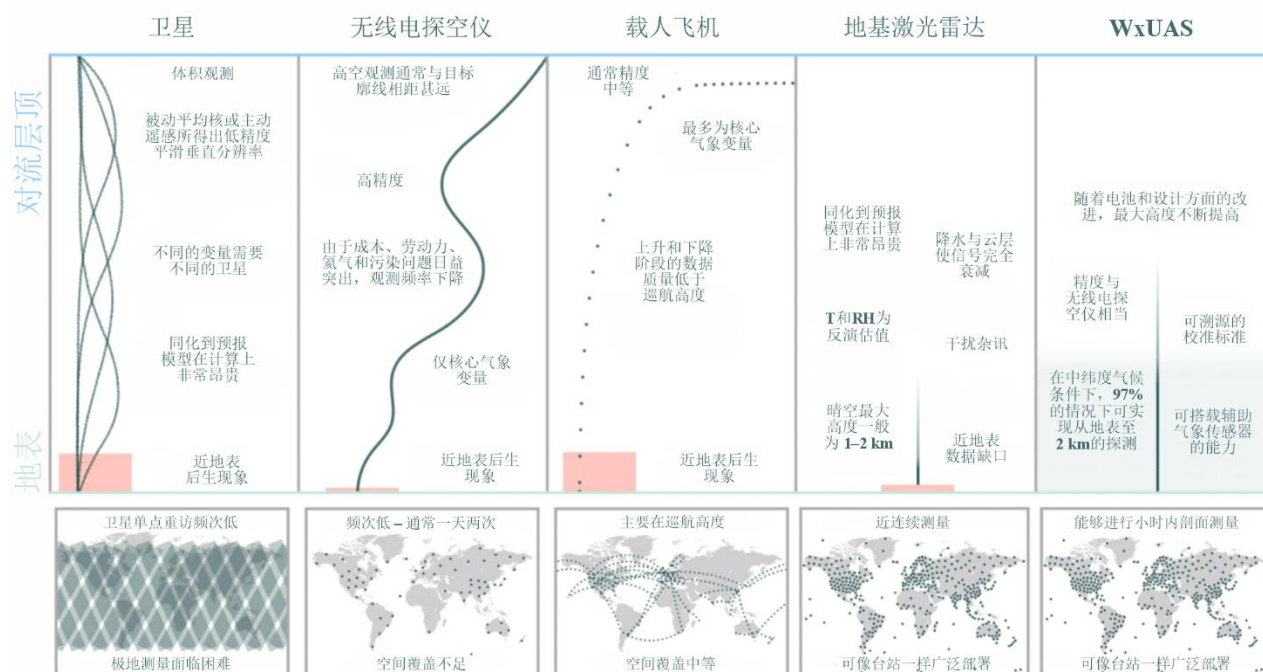
多年来已开发了一些专用无线电系统，用于分发预报及其他气象数据。其中最简单的就是语音广播。这些系统通常使用VHF无线电，民众仅需使用基本的设备。这些系统用于向公众预警具威胁的风暴、洪水、极端温度及其他自然和人为灾害。可提供增强功能，例如使用特殊设备向听障人士推送简短数据传输。这些系统也可设计为提供连续的数据分发，或者保持静默，直至收到表示恶劣天气或其他将临灾害的警示音后启动分发。固定或移动服务，包括海上移动服务，可能都有分发系统。其他分发系统通过无线电和电视广播（地面和卫星）以及MetSat下行链路运行（详见第2章）。

7.3 天气传感无人机系统

天气传感无人机系统（Wx-UAS）对于气象和地球观测业务变得日益重要。在许多现行的观测网络中，并未在改进中尺度分析所需的时空尺度上对边界层和低层大气进行采样，Wx-UAS为部分填补这一观测空白创造了新机会（见图7-1）。

图7-1

五个测量系统水平与垂直覆盖率对比图，标注近地表测量缺口



Meteo 07-01

Wx-UAS可用于多种应用，包括边界层常规垂直廓线、在无线电探空仪数据历来缺失的海域上施放下投式探空仪、飞入热带气旋实地收集数据，以及灾害性天气或旱情所影响地区航空侦察。Wx-UAS用于气象业务可改进数值天气预报以及强化飓风登陆区预报、增加向公众提供预报的时间提前量，并有助于进一步了解气候条件。

气象用途的Wx-UAS作业通常使用免许可频谱来指挥和控制飞机，不过有些系统确实使用许可频率。除了Wx-UAS的指挥和控制外，载荷数据传输还需要频谱。

7.4 水文系统

洪水是发生在世界许多地区的自然现象，能够帮助预测其发生、位置和幅度的系统挽救了许多生命和大量财产。先进的知识可实施相应的减缓措施，例如疏散脆弱人群、修建堤坝和水坝，以及尽可能转移贵重财产。

气象雷达网（见第4章）及其他实地观测是观测水文过程的重要工具，作为其补充，特定的水文系统还可用于测量降水、河流水位以及积雪的深度和范围，所有这些均是洪水预测和预警所需的参数。这些参数可用于估算水资源的可用性。

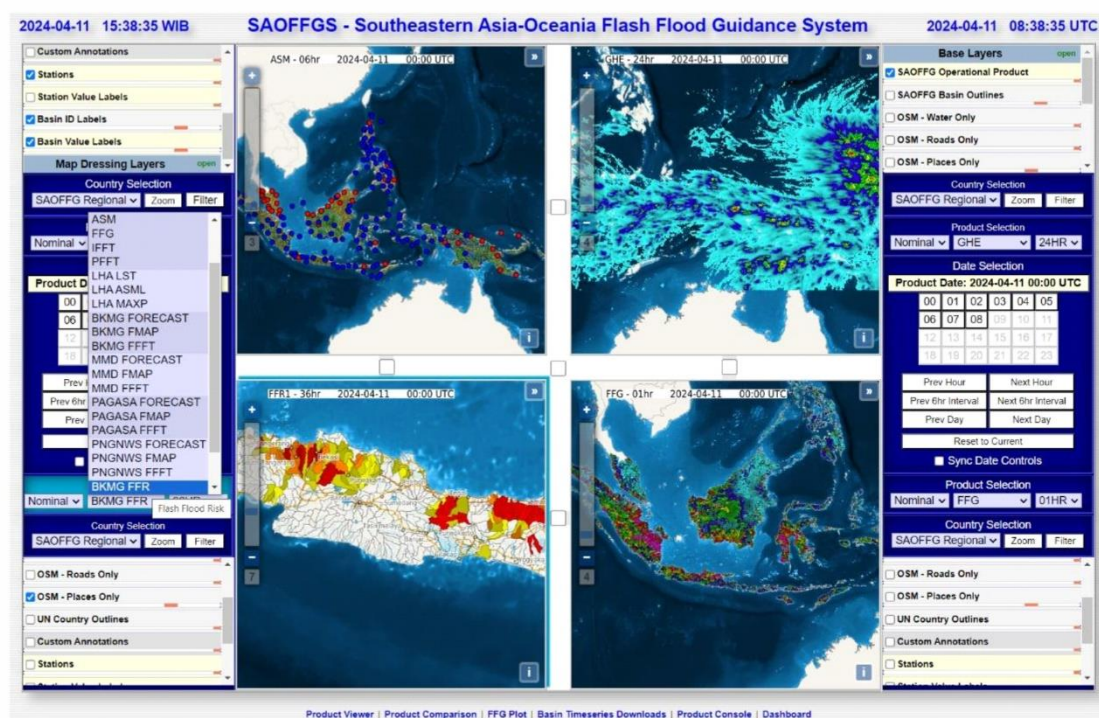
长期受洪水困扰的社区以及一旦发生洪水就易受巨大损失的社区一直在寻找途径，最大限度减少洪水相关损失；同时保持有效利用通常开展主要工农业活动所在地的洪泛区以及人类居住区。自动水文观测系统是一个有优势的解决方案，因为其运行成本低且可补充和增强水库闸门调度、洪水保险或洪泛区域区划等其他洪水管理方法的运用。

自动水文观测系统有测量相关参数的事件报告气象和水文传感器、无线电通信设备及电脑软件和硬件。在最简单的形式中，编码信号通常使用固定或移动服务下的VHF或UHF频段，通过无线电通信设传输至一个基站，通常是通过中继站。基站收集那些编码信号并将其处理成为有意义的水文气象信息，该信息可显示或与警报系统绑定，当超过预定标准时，可通知应急管理人员。

实例参见全球覆盖的《骤洪指导系统》（FFGS/WGC）。它将遥感降水数据（如雷达和星基降雨估算）与土壤饱和度信息、水文和NWP模式相结合，可为国家业务预报员及灾害管理机构提供实时指导产品。这些资源对于为在全球70多个国家制作骤洪警报至关重要（见图7-2）。

图7-2

FFGS地图服务器界面示例



7.5 全球导航卫星系统（GNSS）的气象用途

所有全球GNSS系统的信号均可用于气象应用，参见本节。这些测量在本质上是机会型，因为国家气象和水文部门依靠的信号来自保障无线电导航的系统，而非环境监测；这包括由各卫星机构运营的多个系统：

- US全球定位系统（GPS）：以1575.42 MHz（指定的L1）、1227.6 MHz（L2）和1176.45 MHz（L5）传输的信号；
- 欧洲伽利略系统：频率为1575.42 MHz（记为E1）、1176.45、1191.795和1207.14 MHz（E5）以及1278.75 MHz（E6）；
- 中国北斗导航卫星系统（BDS）：频率为1575.42 MHz（B1）、1176.45 MHz（B2）和1268.53 MHz（B3）；
- 俄罗斯GLONASS系统：频率集中在1601.72 MHz（L1）和1245.78 MHz（L2）；
- 日本QZSS等一些区域GNSS系统，以GPS频率传输信号。

7.5.1 气象观测平台的准确位置和时间

气象观测平台的位置，例如气象气球携带的无线电探空仪、降落伞上的下投式探空仪（见第3章）、携带气象传感器的无人驾驶飞机（见第7节）或海洋气象系统，例如海洋浮标。

遥远观测站之间的精准时间同步，例如闪电探测系统所要求的（见7.6节）。

7.5.2 大气和地表测量

地基接收器收到的GNSS信号的相位延迟可反演大气水汽总量测量值（“GNSS地基观测”）（M. Bevis等人，1992；Bonafoni等人，2019）。水汽总量的计算需要准确了解各类GNSS卫星和接收器的位置，以及对发射机和接收器的时钟误差估算。信号经电离层传播产生的相位延迟可通过两个GNSS频率间的相位延迟差值确定，并据此修正。如果地面气压和温度同样已知，信号经大气传输产生的相位延迟可进一步分为干分量和湿分量，最终可估算出沿卫星路径的水汽总量。地面GNSS传感器可在短时间内接收许多方向信号，但可推算出垂直水汽总量。

空基或机载GNSS信号掩星测量可反演得出温度和湿度廓线，这称之为无线电掩星法（RO）。在独立卫星、飞行器或气球上安装的RO接收器可接收GNSS星群采用临边探空几何方式通过大气传输的信号。GNSS信号因中性大气和电离层对其中GPS信号的折射而产生的弯曲角，可在地球表面上空不同高度上进行测量。这可导出空气的折射率作为高度的函数。两个GNSS频率可用来消除电离层对接收信号的影响，因此，在中性大气反演之前先进行电离层校正。在中性大气的上部，湿度可忽略，空气的折射率可假设直接取决于温度。在接近地表的高度，温度和湿度会影响折射率，且需要用变分反演等方法加以区分。在NWP应用中，弯曲角或折射率观测数据可直接加以使用，无需反演温度和湿度。用这种技术反演的气象变量测量值显示出约几百米的高垂直分辨率，沿着视线方向的约200-300 km水平分辨率，垂直分辨率为1.5-2 km。与水汽总量测量一样，这项技术需要精确了解卫星位置和时钟误差（Anthes（2011），Yue等人，（2014），Bonafoni等人，（2019）以及Ho等人，（2020））。

测量出现的水凝物：除了传统的RO测量外，在常规RO的演变中（极化RO，或GNSS-PRO），分别观测GNSS信号的水平极化和垂直极化分量有助于探测水凝物。此类测量已证明对强降水和云中冰粒相关的大水滴的敏感性（F. Turk等人，（2024））。

电离层和电子密度的测量：第6章详述了GNSS信号用于电离层测量和空间天气监测（§ 6.2.3.3.8）。

对海面风速、土壤水分、海冰特征和雪深的测量：(1) 在天底几何观测时，从地表反射（GNSS反射计，或GNSS-R）并从空间观测的GNSS信号，带有海面风速（不是方向）、土壤水分、海冰特征和雪深等信息，这些信号是基于幅度或信噪比测量，通常仅在单一频率进行测量；(2) GNSS-R在极低仰角观测且海面处于平静条件下，还可通过载波相位测量对海面和海冰特性进行高度反演。(3) 机载；(4) 地基GNSS接收器可利用GNSS-R技术，利用地表反射信号来观测土壤水分、冰雪特征（Rodriguez-Alvarez（2023））。

7.6 雷电探测系统

闪电活动遥感是业务气象工作者使用的重要工具，因为准确和及时的闪电信息与陆地、海洋和空中的公共安全考虑存在明确关联。随着天气雷达和气象卫星产品使用的进步，用户需求也在不断发展。

这些系统的可靠运行直接关系到公共安全考量，因为提供有效的预报服务会影响商业和国防活动的效率。从事电力线工作的工程师和爆炸装置处置人员的安全就是受益于有效闪电预报的范例。

闪电探测是一项被动活动，它是利用无线电接收器探测闪电（天电）电磁发射。各探测站点的数据可通过各种通信技术进行分发，包括固定链接、移动网络、互联网等（见§ 7.2）。

在当前的业务系统中，电闪位置的确定通过测量相关天电到达的方向（三角定位法）；天电到达时间（TOA）；抑或二者的结合。

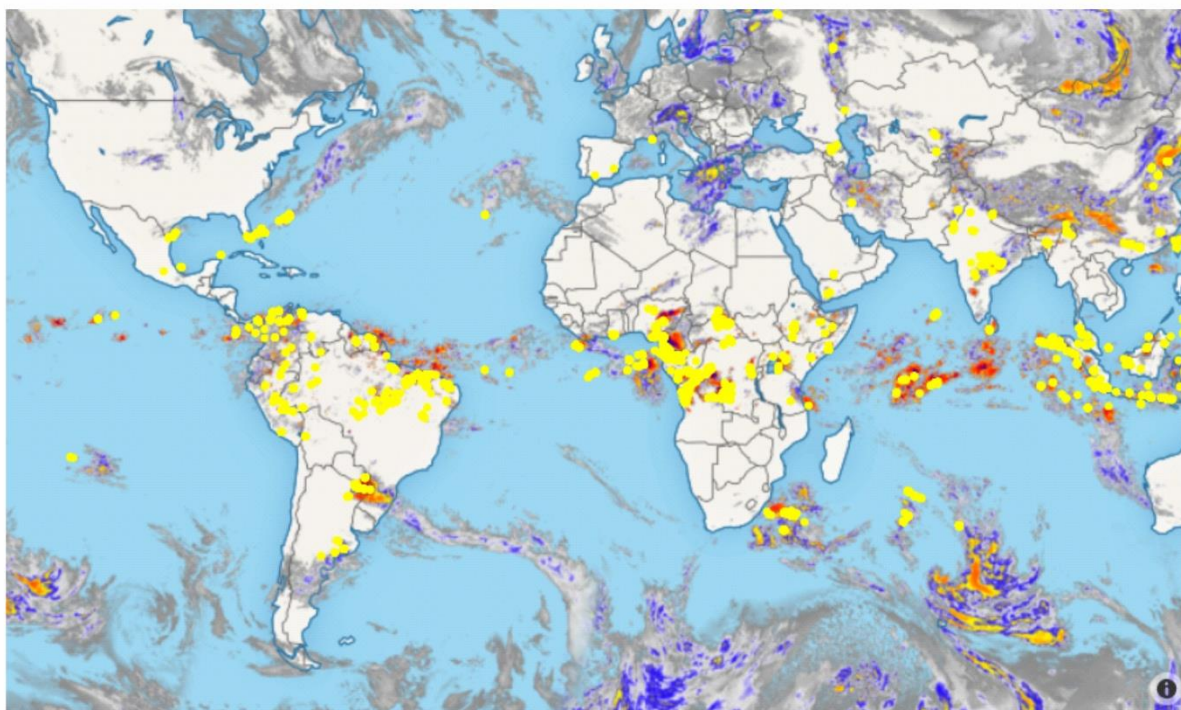
如果使用三角定位法，则需在三个或更多宽间距探测点测量。然而，对于基于TOA的系统，最少要用4个以上的站点。实际上要用到更多的站点，以便提升所报告位置的可靠性。在观测距离达到数百公里以上时，TOA系统提供的定位通常比测向系统更准确。这是由于对站点所探测天波的接收方向通常与放电的实际方向略有不同，并且会随测站附近地表层状况而变化。TOA系统通常特别依靠GNSS信号（见§ 7.5.1）以便在各个遥感点实现必要的时间同步。所有系统均依靠从遥远站点到中央处理器的成本效益、可靠通信。

用于闪电活动定位的无线电频率会随着所需监测地区和系统的具体用途而有所不同。

10 kHz左右（8-11.3 kHz）VLF观测频率，在操作上可实现数千公里超远距离定位，例如全球闪电定位网络（WWLLN）、全球闪电数据集（GLD360）（见图7-3）、全球闪电探测网络（LINETglobal）或利用到达时间差的闪电电磁发射定位（LEELA）。对于这些系统，天电通常是在间隔数千公里的台站接，在传感器站点记录，并将定时样本立即传输到中央控制站，然后根据到达站点的时间差计算闪电放电的位置。有时可在受影响传感器站点使用可调陷波滤波器来抵消低水平的干扰，但大范围的更高水平干扰对系统运行极为不利。

图7-3

GLD360长距离闪电探测网测得的两分钟全球闪电探测数据叠加在显示云和降水的卫星数据上。



Meteo 07-03

例如，在LEELA系统中（由英国气象局运营），分布在欧洲各地、间隔2 000公里的11个接收器连续将带时间戳的VLF数据传输至中央处理器。然后，LEELA的中央处理器从输入数据流中提取雷电波形，根据波形相关性对其进行分组，然后利用波形之间的到达时间差，采用多边形定位计算雷击位置。LEELA波形提取算法使雷电波形和背景噪声能够被分解，从而自动减轻干扰。

考虑到这种长距离闪电探测的重要性以及需要全球认可，WRC-12将8.3-11.3 kHz波段专门分配给气象辅助服务，但仅限于无源传感器。由于闪电探测使用无源（仅接收）传感器，因此闪电探测系统也可无保护地在不同频段运行。

最广泛使用的业务系统可对更有限的地区进行精细覆盖。在这种情况下，天电信号在200 kHz左右的更高频率进行观测（所用的宽带接收器在其1 kHz至350kHz范围的中间部分最灵敏），遥感站点通常间隔100公里至400公里，这取决于重点是云地闪电还是云际闪电。在这些较高频率下，云地放电可通过天电前缘的幅度明显上升段来识别。这一前缘的到达时间可精确测定。探测网各站点测得的时间被传输到中央处理器，并用于计算放电位置。在某些情况下，结合早年安装的磁场测向系统共同处理网络测得的到达时间差。技术和系统概述参见WMO No. 8《仪器和观测方法指南》第三卷—第6章观测系统。

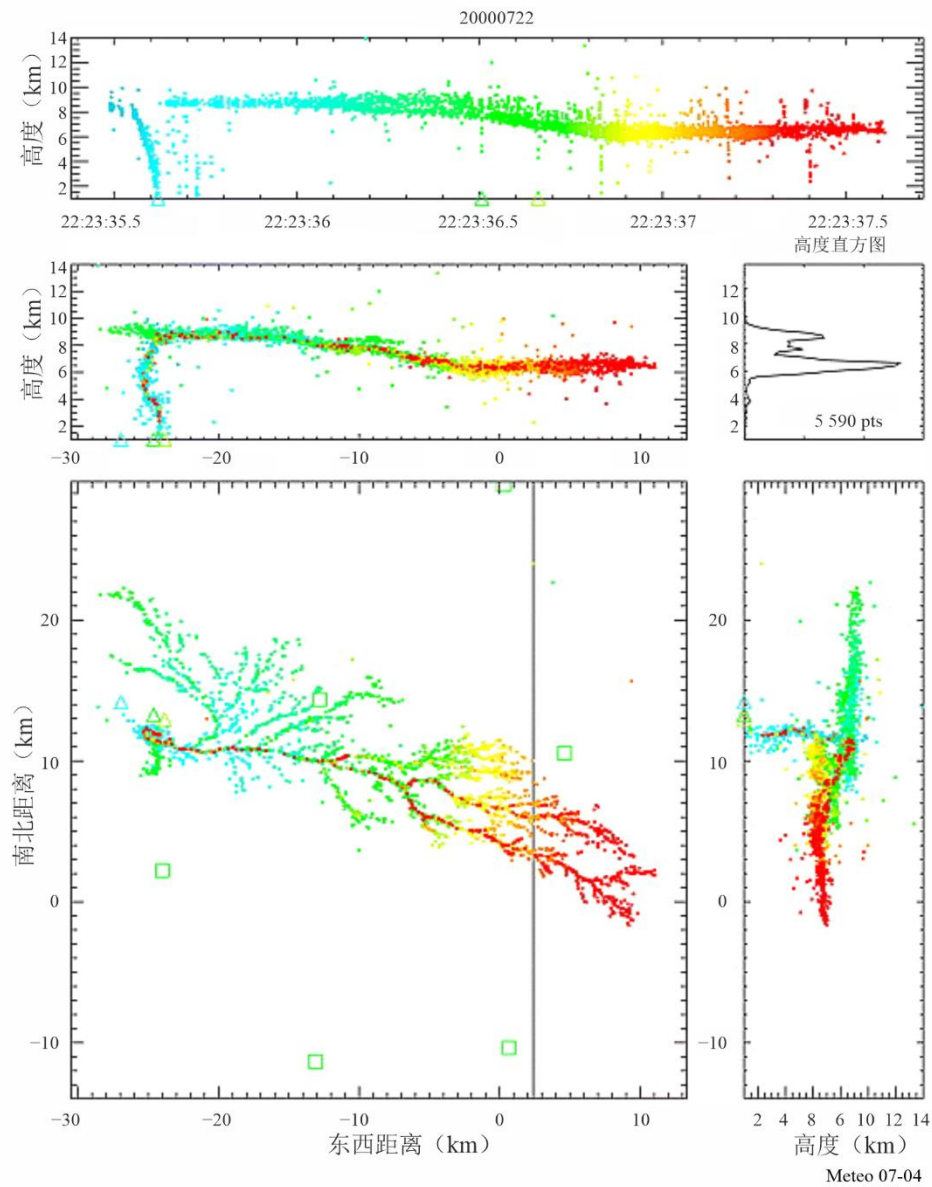
此外，为了绘制完整的闪电通道，有闪电测绘阵列（LMA）系统，以非常高的频段（VHF频段60-66 MHz）进行观测，例如新墨西哥理工学院的LMA（Thomas等人，2004）。图7-4为新墨西哥理工学院LMA观测到的闪电放电示例，表明的是该系统能够获得的空间分辨率。闪光是负极性的云地放电，发生在网络的北部，通过测量得到了精确定位。该放电通过其母风暴传播了很大的水平距离（40公里）；在此过程中，击穿通道形成了精细的树枝状结构，并被测绘系统清晰地分辨。在2秒钟的闪光持续时间内，定位了5 000多个闪电源。

对于此类详细探测，如果要观测全部闪电活动，风暴必须保持在视线范围内。这就要求对地面传感器进行短基线配置 – 传感器间距30公里，距地面约50米，以满足雷达地平标准。然而，实际上，有些云际活动业务观测系统的运行是利用更远间隔的地面传感器，依靠较低频云地系统来填补较低高度的放电详情。

图7-4中的各小图是闪电演变过程图：高度-时间（上）、平面图（左下）、东西投影（中左）和南北投影（右下）。直方图（中右）为闪电源高度。三角形表示国家闪电探测网（NLDN）测得的负地闪时间和位置。平面图中的方块表示测量站的位置，竖线表示科罗拉多州和堪萨斯州的边界。

图7-4

新墨西哥理工学院LMA观测的负极性云地放电辐射源，并说明了LMA系统可获得的空间分辨率。



7.7 地基微波辐射计

利用卫星无源遥感进行的垂直大气探测详见第5章 (§ 5.1)。从事详细本地预报的气象学家，或研究行星边界层的科学家，都需要大气探测，但其近地面垂直分辨率要求高于星基系统所能提供的水平。

提供该信息的一种方法是使用仰视无源遥感，辐射计安装在地表。这些辐射计使用精选的通道来测量以下两个氧波段的温度结构：22 GHz – 32 GHz和50 GHz – 58 GHz。详见报告ITU-R RS.2489以及下表7-1。水汽和云的测量也受益于90 GHz左右和183 GHz水汽吸收频段低频翼的额外观测。无源臭氧（尤其是在142 GHz频段）也受益于大量地基辐射计站点。

尽管温度和湿度地基遥感通道与无源卫星遥感频段处于相近频段范围，但它们通常使用更宽的频段，包括与其他服务共享的频段。在某些频段，特别是RR No. **5.340**涵盖的频段或分配给射电天文服务的频段，地基辐射计受益于与卫星遥感相同的保护；但在其他频段，地基辐射计不受国际保护。

表7-1

地基无源辐射计使用的频段

通道中心频率（GHz）	通道中心频率（GHz）
22.24	
23.04	
23.84	RR No. 5.340 适用（23.6-24 GHz）
25.44	
26.24	
27.84	
31.4	RR No. 5.340 适用（31.3-31.5 GHz）
51.26	
52.28	
53.86	RR No. 5.340 适用（52.6-54.25 GHz）
54.94	EESS（无源）主用划分（54.25-59.3 GHz）
56.66	
57.3	
58.0	

全球现役地基辐射计数量仍相对较少（几百个），但预计近期将部署更多的辐射计。可能需要开发一种务实的共享方法，将辐射计有意布设在可避免其他服务干扰的地方。

7.8 微波无线电衰减系统

目前正在研究各类技术，利用商用微波链路（CML，例如移动网络回传或卫星数据传输）信号的衰减估算降雨量。虽然在考虑地基移动网络或卫星链路时需要的方法略有不同，但这两种技术均依赖5 GHz至40 GHz之间的传输。不同于GNSS测量（见§7.5），CML测量依赖获取有足够时间分辨率和时效的第三方数据，而当数据所有者可能不关注环境测量时，这就成为一大难题。

这些技术测量由传输路径中降雨导致的信号强度变化。该范围内的信号衰减易受与降雨率（*R*，单位mm/h）相关的衰减（*k*，单位dB/km）的影响，依据的是下列方程：

$$k = aR^b$$

式中*a*和*b*取决于传输的信号频率和极化。*a*的数值随频率升高而增加。即对于相同的降雨量，高频率会出现更强的衰减。*b*的数值接近1，尤其是在30 GHz左右，使关系呈线性，或近似线性。

测量依靠消除其他信号变化源，例如传输调整、天线受潮、闪烁和阳光致盲（其幅度可与雨衰相当），以确定精确的基线，从而量化传输路径上的雨衰。在强降雨期间，信号也可能衰减到完全消失的程度，这可以说是雨量测量之最重要的时机。

来自CML的数据可为有大量商业微波链路的陆地地区提供降雨量测量的有用补充数据源。这有助于填补雨量器和天气雷达网络的数据空白，这些数据在没有现有降雨测量网络的国家可能尤其宝贵。虽然研究还在进行中，但许多国家气象部门尚未在业务上采用CML测量。

参考文献

WMO文本

- WMO-No. 8 – Guide to Instruments and Methods of Observation Volume III – Observing Systems: Guide to Instruments and Methods of Observation <https://library.wmo.int/records/item/68661-guide-to-instruments-and-methods-of-observation?offset=3>
- WMO-No. 1318 – Global Demonstration Campaign for Evaluating the Use of Uncrewed Aircraft Systems in Operational Meteorology: White Paper [2023], <https://library.wmo.int/records/item/66308-global-demonstration-campaign-for-evaluating-the-use-of-uncrewed-aircraft-systems-in-operational-meteorology-white-paper>

ITU-R文本

- Recommendation ITU-R M.1874-1 – *Technical and operational characteristics of oceanographic radars operating in sub-bands within the frequency range 3-50 MHz.*
- Report ITU-R M.2321 – *Guidelines for the use of spectrum by oceanographic radars in the frequency range 3 to 50 MHz.*
- Report ITU-R RS.2489 – *Technical and operational characteristics of ground-based passive sensors operating in the 51-58 GHz frequency range.*

参考书目

- 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.
- ANTHES, R.A. [2011], *Exploring Earth's atmosphere with radio occultation data: contributions to weather, climate and space weather*, Atmos. Meas. Tech., 4 (1077-1103) , doi: <https://doi.org/10.5194/amt-4-1077-2011>
- BÄRFUSS, K. B., SCHMITHÜSEN, H., AND LAMPERT, A.: *Drone-based meteorological observations up to the tropopause – a concept study*, Atmos. Meas. Tech., 16, 3739–3765, <https://doi.org/10.5194/amt-16-3739-2023> , 2023.
- BEAN, B. R. and DUTTON, E. J. [1966] *Radio Meteorology*, National Bureau of Standards Monograph 92, US Government Printing Office, Washington DC, United States.
- BEVIS, M., S. BUSINGER, T. A. HERRING, C. ROCKEN, R. A. ANTHES, AND R. H. WARE [1992], *GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system*, J. Geophys. Res., 97 (D14) , 15787–15801, doi: <https://doi.org/10.1029/92JD01517>

- BONAFONI, S., BIONDIB, R., BRENOTC, H., ANTHES, R. [2019], *Radio occultation and ground-based GNSS products for observing, understanding and predicting extreme events: A review*, Atmospheric Research, 230 (104624) doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104624>
- 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.
- CHWALA C, KUNSTMANN H. [2019], *Commercial microwave link networks for rainfall observation: Assessment of the current status and future challenges*. WIREs Water. 6:e1337. <https://doi.org/10.1002/wat2.1337>
- DOVIK, R. J. and ZRNIC, D. S. [1984] *Doppler radar and weather observations*. Academic Press, Inc., San Diego, United States of America.
- DOVIK, R. J. and ZRNIC, D. S. [1993] *Doppler radar and weather observations*, 2nd Ed. Academic Press, Inc., San Diego, United States of America.
- DOVIK, R. J., ZRNIC, D. and SIRMANS, D. [November 1979] *Doppler Weather Radar*. Proc. IEEE, Vol. 67, 11.
- DOVIK, 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.
- GIANNETTI, F, AND RUGGERO R. [2021]. *Opportunistic Rain Rate Estimation from Measurements of Satellite Downlink Attenuation: A Survey*, Sensors 21, no. 17: 5872. <https://doi.org/10.3390/s21175872>
- 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.
- HO, S.-P., ANTHES, R.A., AO, C.O., HEALY, S., HORANYI, A., HUNT, D., MANNUCCI, A.J., PEDATELLA, N., RANDEL, W.J., SIMMONS, A., STEINER, A., XIE, F., YUE, X., ZENG Z. [2019], *The COSMIC-FORMOSAT-3 radio occultation mission after 12 years: accomplishments, remaining challenges, and potential impacts of COSMIC-2*, Bull. Am. Meteorol. Soc., 100, p. 2019, DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0290.1>
- JAKOWSKI, N., & HOQUE, M. M. [2019]. *Estimation of spatial gradients and temporal variations of the total electron content using ground-based GNSS measurements*, Space Weather, 17, 339–356. <https://doi.org/10.1029/2018SW002119>
- 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.
- LEE, A.C.L. [1986b] *An operational system for the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 3 (4) , 630–642.
- 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.

- 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.
- RHEINSTEIN, J. [1968] *Backscatter from Spheres: A Short Pulse View*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **AP16**, No. 1, January 1968.
- RODRIGUEZ-ALVAREZ, N.; MUNOZ-MARTIN, J.F.; MORRIS, M., [2023] *Latest Advances in the Global Navigation Satellite System – Reflectometry (GNSS-R) Field*, Remote Sens., 15, 2157. <https://doi.org/10.3390/rs15082157><https://doi.org/10.3390/rs15082157>
- SEEMALA, GOPI KRISHNA, [2023], Chapter 4 – *Estimation of ionospheric total electron content (TEC) from GNSS observations*, Editor (s) : Abhay Kumar Singh, Shani Tiwari, In Earth Observation, Atmospheric Remote Sensing, Elsevier, Pages 63-84, ISBN 9780323992626
- 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.
- 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.
- THOMAS, R. J., P. R. KREHBIEL, W. RISON, S. J. HUNYADY, W. P. WINN, T. HAMLIN, and J. HARLIN [2004], *Accuracy of the Lightning Mapping Array*, J. Geophys. Res., 109, D14207, doi: <https://doi.org/10.1029/2004JD004549>
- TURK, F. J., and Coauthors, [2024], *Advances in the Use of Global Navigation Satellite System Polarimetric Radio Occultation Measurements for NWP and Weather Applications*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 105, E905–E914, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-24-0050.1>
- YU.V. YASYUKEVICH, A.A. MYLNIKOVA, A.S. POLYAKOVA, [2015], *Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data*, Results in Physics, 5 (32-33), ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.12.006>
- YUE, X., W. S. SCHREINER, N. PEDATELLA, R. A. ANTHES, A. J. MANNUCCI, P. R. STRAUS, AND J.-Y. LIU (2014), *Space Weather Observations by GNSS Radio Occultation: From FORMOSAT-3/COSMIC to FORMOSAT-7/COSMIC-2*, Space Weather, 12, 616–621, doi: <https://doi.org/10.1002/2014SW001133>
- 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.

附件

缩略语表

A.1 气象常用缩略语

A		BPS	比特/秒
A/D	模拟转数字	BPSK	二进制移相键控法
AAAS	美国科学促进协会	BR	国际电联无线电通信局
AARS	自动飞机报告系统	BW	带宽
ABSN	南极基本天气站网	C	
ACARS	飞机通信寻址与报告系统	C/N_0	载噪密度比
ACCAD	气候应用和数据咨询委员会	C&DH	指令与数据处理
ACMAD	非洲气象应用促进发展中心	CaeM	航空气象学委员会
ADAS	机载数据采集系统	CAGM	农业气象学委员会
ADC	模拟数字转换器	CAS	大气科学委员会
ADEOS	先进地球观测卫星（日本）	CBS	基本系统委员会
ADP	自动数据处理	CCD	电荷耦合器件
ADPE	自动数据处理设备	CCIR	国际无线电咨询委员会（见ITU-R）
AFC	自动频率控制		
AFOS	自动预测和观测系统	CCI	气候学委员会
AGC	自动增益控制	CCRS	加拿大遥感中心
AGRHYMET	农业气象学和业务水文学及其应用区域培训中心	CCSDS	空间数据系统咨询委员会
AIRS	先进红外探测器（NASA仪器）	CDA	指令和数据收集
ALC	自动电平控制	CDAS	指令与数据收集站
AM	调幅	CEOS	地球观测卫星委员会
AMDAR	航空器气象资料下传	CERES	云和地球辐射能量系统
AMI	美国气象学会	CGMS	气象卫星协调组
AMSR	先进气象温度探测器	CHy	水文学委员会（WMO）
ANSI	美国国家标准学会	CIESIN	国际地球科学信息网络集团
AOPC	气候大气观测专门委员会	CIMO	仪器和观测方法委员会
AOS	信号采集	CIMSS	气象卫星研究合作机构
APT	自动图像传送	CLICOM	气候计算
ARGOS	NOAA系列卫星数据收集和定位系统	CLINO	气候平均值
		CLIPS	气候信息和预测服务
ASCII	美国信息交换标准码	CLIVAR	气候变率和可预测性
ASIC	专用集成电路	CMA	中国气象局
ATMS	先进技术微波探测器（NPOESS/NASA）	CMD	指令
ATOVS	先进TIROS业务垂直探测器	CMIS	圆锥扫描微波成像仪/探测器（NPOESS仪器）
ATSR	沿轨扫描辐射计	CMM	海洋气象学委员会
AVCS	先进视频摄影系统	CNES	法国空间研究中心
AVHRR	先进甚高分辨率辐射计	CNIE	国家空间调查委员会
AWIPS	先进天气信息处理系统	COADS	海洋大气综合数据集
B		CONUS	美国本土
BCD	二-十进制编码	COP	缔约方大会
BER	误码率		

C (续)

COPUOS	和平利用外层空间委员会
CORSSAC	民用业务遥感卫星咨询委员会
COSPAS	俄罗斯星载搜救系统。见 SARSAT
CPCSA	气候项目协调和支持活动
CPR	云物理辐射计或心肺复苏
CPU	中央处理器
CRC	循环冗余校验/循环冗余码
CrIS	跨轨红外探测仪 (NPOESS 仪器)
CrMIS	跨轨微波成像仪 - 探测仪 (NPOESS仪器)
CRT	阴极射线管
CSA	加拿大航天局
CS&C	通信交换和控制 (GMACS系统的CDA部分)
CSIRO	澳大利亚联邦科学与工业研究组织
CSIS	集中式风暴信息系统
CSM	气候系统监测
CSMA/CD	载波监听多路访问/冲突检测
CSTR	科学技术研究委员会
CTCS	CDA测控系统 (GIMTACS系统的CDA部分)
CW	连续波
CZCS	海岸带彩色扫描仪
D	
D/A	数字转模拟
DAAC	分布式动态存档中心
DADS	数据存档和分发系统
DAPS	DCS自动处理系统
DAS	数据采集系统
DAS	数据库管理系统
DAS	直接存取系统
dB	分贝
DB	直播
DBMS	数据库管理系统
DCPLS	数据收集平台定位系统
DCP	数据收集平台
DCPI	数据收集平台查询
DCPR	数据收集平台接收
DCR	微分关联辐射计
DCS	数据收集系统
DEMUX	信号分离器
DIFAX	数字传真
DIR	日间红外
DLI	下行链路接口 (DM/PM)

DLM	下行链路监测器
DLR	德国航天局 (Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt)
DMSP	国防气象卫星计划
DN	降交点
DOMSAT	国内 (通信) 卫星
DPT	数字图像终端
DR	直接读取
DRGS	直接读取地面站
DS	驻留探测或探测 (GOES-4/7 VAS操作节点)
DSARS	DAMUS卫星存档和检索系统
DSB	直接探测仪信标
DSB	直接探测仪广播
DSN	深空网
DUS	数据利用系统
E	
EBR	电子束记录器
EC/AGE	执行理事会气象和电子校准交换咨询组
ECMWF	欧洲中期天气预报中心
EDC	EROS数据中心
EDIMS	环境数据和信息管理系统
EES	地球探测卫星
EESS	地球探测卫星业务
EIRP	等效全向辐射功率
EIRPSD	等效全向辐射功率谱密度
ELT	应急定位发射机
ELV	一次性运载火箭
EMC	电磁兼容
EMI	电磁干扰
ENSO	厄尔尼诺—南方涛动
ENVISAT	环境卫星
EOS	地球观测卫星
EPIRB	应急无线电示位标
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	欧洲空间局
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

E (续)

ETM	增强型专题绘图仪
ETS	工程试验卫星
EUMETSAT	欧洲气象卫星开发组织
EUV	极紫外线

F

FAX	传真
FC	假彩色
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	固定卫星业务
FSS	飞行调度软件系统

G

GAC	全球区域覆盖
GAME	GEWEX 亚洲季风实验
GARP	全球大气研究计划
GARS	GOES档案和检索系统
GAW	全球大气监视网
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	法国航天航空遥感发展集团
GEO	静止地球轨道
GEWEX	全球能量与水循环实验
GHz	千兆赫、吉赫
GIMGSP	地球静止轨道业务环境卫星I-M地面系统项目
GIMTACS	地球静止轨道业务环境卫星I-M遥测与指令系统
GIS	地理信息系统
GMACS	地球静止轨道业务环境卫星监控系统(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	地球静止轨道业务环境卫星
GOMS	地球静止轨道业务气象卫星
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(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(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	全球天气中心

H

H1/3	有效波高
HEPAD	高能质子和 α 粒子探测器
HiRID	高分辨率成像仪数据
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10分钟扫描一次
HRIS	高分辨率红外探测器, 或高分辨率干涉探测器
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
Hz	赫兹(曾称“周/秒”)

I

I/O	输入/输出
I/S	成像仪和探测器
IAHS	国际水文科学协会
IAMAS	国际气象学和大气科学协会
IASI	红外大气探测干涉仪
ICES	国际海洋考察委员会
ICSAR	国际搜救委员会
ICSU	国际科学联盟理事会
IEEE	电气电子工程师协会
IF	中频
IFOV	瞬时视场
IFRB	国际频率登记委员会(参见BR)

I (续)

IGBP	国际地圈-生物圈计划
IGF	图像生成设施
IGFOV	瞬时视场角
IGOSS	全球海洋综合服务系统
IHP	国际水文计划
INDOEX	印度洋实验
INPE	空间研究院
INR	图像导航和注册
INR	干扰噪声比
INSAT	印度卫星
IOC	政府间海洋学委员会
IODE	国际海洋数据和信息交换
IPCC	政府间气候变化专门委员会
IPD	中频信号检测器 (CDA)
IR	红外
IRIG	美国靶场间仪器组
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咨询专门委员会
ISO	国际标准化组织
ITOS	改进型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	联合冰情中心
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/秒
keV	千电子伏特
kHz	千赫
KSC	肯尼迪航天中心
KSPS	千采样/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	地标提取
LEO	近地轨道
LEOP	发射和早期轨道阶段
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	行数/英寸
lpm	行数/分钟
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	兆比特/秒
MB/s	兆字节/秒
MCC	任务控制中心
MCDW	世界气候资料月报
MCS	水汽通道支持
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
METEOSAT	欧洲对地静止气象卫星
METOP	欧洲极轨气象卫星
MetSat	气象卫星
MeV	兆电子伏特
MeV/n	兆电子伏特/核子
MHS	微波湿度计
MHz	兆赫
MLS	微波临边探测器
MODEM	调制解调器
MODIS	中分辨率成像光谱仪 (NASA仪器)
MOPITT	对流层污染测量 (NASA)
MOS	海洋观测卫星 (日本)
MPERSS	海洋污染应急响应支持系统

M (续)

mr	毫弧度
MSFC	马歇尔航天飞行中心
MSI	多光谱成像
MSS	移动卫星业务
MSS	多光谱扫描器
MSU	微波探测仪
MTBF	平均故障间隔时间
MTF	调制传递函数
MUX	多路器
MW	动量轮、中波、微波兆瓦
N	
N/S	北/南
NASA	美国国家航空航天局
NASCOM	NASA通信网
NASDA	日本国家宇宙开发事业团
NCDC	国家气候数据中心
NE-delta-N	噪声等效辐射变化
NE-delta-T	噪声等效温度变化
NERC	国家环境研究委员会
NESDIS	国家环境卫星数据信息服务
NF	噪声系数
NHC	国家飓风中心
NHS	国家水文局
NIR	夜用红外, 或近红外
NMC	国家气象中心
NMS	国家气象或水文气象局
NNODS	NOAA/NOSS海洋数据系统
NOAA	国家海洋和大气管理
NOAA	极轨METSAT
NOS	国家海洋测绘局
NPOESS	国家极轨业务环境卫星系统
NRCT	泰国国家研究委员会
NROSS	海军海洋遥感系统
NRSA	国家遥感局
NRZ	不归零制
NRZ-L	不归零电平
NSSFC	国家强风暴预报中心
NSSL	国家强风暴实验室
nT	纳特斯拉, 磁场强度的测量单位
NWP	数值天气预报
NWS	国家气象局
O	
O&M	运营和维护
OAD	轨道和姿态确定
OAR	海洋及大气研究处

OCTS	海色水温传感器
OHP	业务水文计划
OMI	臭氧测量仪器
OMPS	臭氧测绘和廓线仪套件 (NPOESS)
OOPC	海洋气候观测专家组
OQPSK	偏移四相相移键控
P	
P/SEC	脉冲数/秒
P-P	峰峰值
PA	功率放大器
PAM	脉冲振幅调制
PCM	脉冲编码调制
PDL	处理器数据加载
PDR	处理数据中继 (GVAR射频链路)
PE	原始方程
PEP	峰值包络功率
PEP	多项式错误保护 (NASA)
PFD	功率通量密度
Pixels	像素
PKM	近地点发动机
PLL	锁相环路
PM	相位调制
PN	伪噪声
POES	极轨业务环境卫星
PPM	百万分率
PPS	脉冲数/秒
PR	降水雷达
PRF	脉冲重复频率
PROFS	区域观测和预报服务项目
PROMET	提供气象信息工作组
PSK	移相键控
PWM	脉宽调制
Q	
QC	质量控制
QPSK	正交相移键控
R	
R	雷利
RA	雷达高度计
R/Y	滚动/偏航
R&D	研发
RBSN	区域基本天气网
RCS	反作用控制系统
RF	射频、无线电频率
RFI	无线电频率干扰
RGB	红/绿/蓝
RH	相对湿度

R (续)

RHCP	右圆极化
RMDCN	区域气象数据通信网络
RMS	均方根
RPM	转数/分钟
RSS	平方和根
RSU	遥感组件
RT	实时
RW	反作用轮
RWA	反作用轮组件
S	
S/C	航天器
S/N	信噪比
S/N0	信噪密度比
S-VAS	展宽可见和红外自旋扫描辐射计大气探测仪
S-VISSR	展宽可见红外自旋扫描辐射计
SAD	探测器/辅助数据
SAGE	平流层气溶胶和气体试验
SAR	合成孔径雷达或搜救
SARSAT	卫星辅助搜救跟踪；见COSPAS
SATCOM	卫星通信
SBUV	太阳后向散射紫外线
SC/N0	副载波噪声密度比
SC/OMS	业务气象卫星分委会
SC/OES	业务环境卫星分委会
SCHOTI	国家气象部门培训机构领导人常务会议
SCIAMACHY	大气制图扫描成像吸收光谱仪
SCO	副载波振荡器
SCSMEX	南海季风试验
SDUS	小型[卫星]数据使用站
SeaWiFS	海面广角遥感器
SEC	秒
SEM	空间环境监测器
SEU	单粒子翻转
SGLS	太空地面链接系统
SIGWX	重要天气
SIR	航天飞机成像雷达
SIRS	卫星红外光谱仪
SIT	CEOS战略实施组
SLAR	侧视机载雷达
SN	空间网络
SNR	信噪比
SOCC	航天器运行控制中心
SOES	业务环境卫星分委会
SOLAS	国际海上人命安全公约

SPM	太阳质子监视仪
SPOT	斯波特卫星（地球观测卫星）
SQPSK	交错四相相移键控
SPREP	南太平洋区域环境署
SR	扫描辐射计
sr	球面度
SR-IR	扫描辐射计-红外线通道
SR-VIS	扫描辐射计-可见光通道
SSA	WWW系统支持活动
SSM/I	特种传感器微波成像仪
SST	海面温度
SSU	平流层探测器
STA	科技机构
STC	科学技术委员会
Ster	球面度
STS	空间运输系统
SW	短波
SW	交换
SWIR	短波红外线
SXI	太阳X射线成像仪
SXT	太阳X射线望远镜（Solar-A，即阳光卫星航天飞行）
T	
T/P	托佩克斯/海神卫星
T/V	热真空
T&C	测控
TBUS	星历数据报文的4字母标识符
TDM	时分复用
TDRS	跟踪与数据中继卫星
TDRSS	跟踪与数据中继卫星系统
TED	总能量探测器，或海龟逃生装置
TEMS	陆地生态监测系统
TES	对流层发射光谱计
TIP	TIROS信息处理器
TIR	热红外
TIROS	电视红外观测卫星
TLM	遥测
TM	专题制图仪
TMI	TRMM卫星微波成像仪
TMR	托佩克斯卫星微波辐射计
TO	转移轨道
TOGA	热带海洋与全球大气
TOPC	陆地气候观测专家组
TOMS	总臭氧测绘光谱仪
TOS	TIROS业务系统
TOVS	TIROS业务垂直探测器

T (续)

TRMM	热带降雨测量卫星
TRUCE	热带城市气候实验
TT&C	跟踪测控
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	可见光红外成像仪/辐射仪套件 (NPOESS仪器)
VIP	VAS图像处理器 (带P/DU电流 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	甚高分辨率辐射计数据记录仪
VSWR	电压驻波比
VTPR	垂直温度廓线辐射仪
W	
WAFC	世界区域预报中心
WCASP	世界气候应用与服务计划

WCDA	瓦拉普斯 (Wallops) 指令和数据采集 (站)
WCDMP	世界气候数据和监测计划
WCFP	世界气候数据计划
WCP	世界气候计划
WCRP	世界气候研究计划
WDC	世界数据中心
WEFAX	天气传真
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	抛弃式深度温度计
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

A.2 本手册中使用的其它缩略语

CML	商用微波链路
DFS	动态频率选择
ERT	电阻率层析成像
ET-RFC	无线电频率协调专家组
GCOS	全球气候观测系统
GRB	GOES重播
GSO	地球静止轨道
HRIT	高速信息传输
IPS	行星际闪烁
JPSS	联合极地卫星系统
LDS	闪电探测系统
LMA	闪电测绘阵列
non-GSO	非地球静止轨道
RASS	无线电声学探测系统
RLAN	无线局域网
SMMR	扫描多通道微波辐射计
TWTs	行波管
UAS	无人航空器系统
UWB	超宽带
VLF	甚低频
WHOS	WMO水文观测系统
WIGOS	WMO全球综合观测系统
WIPPS	WMO综合处理和预测系统
WIS	WMO信息系统
WPR	风廓线雷达
Wx-UAS	气象传感无人机系统

国际电信联盟

Place des Nations
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

ISBN 978-92-61-40685-1



瑞士出版
2026年, 日内瓦