

高等教育“十三五”规划教材

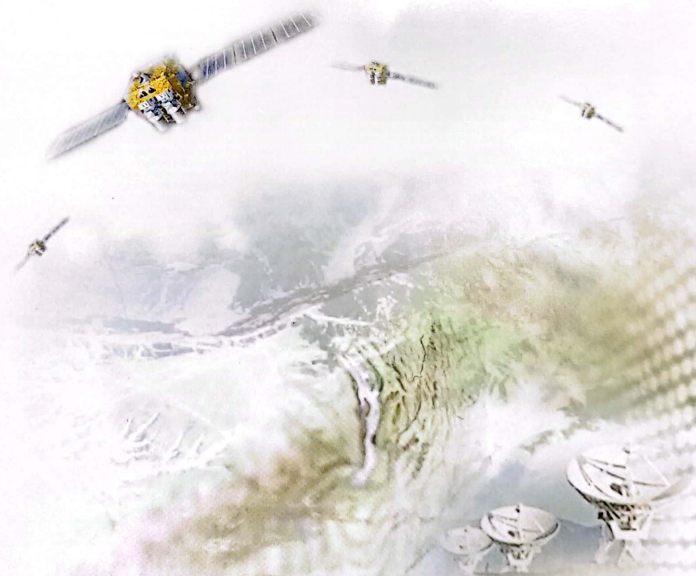


GNSS

导航定位原理与应用

余学祥 董 斌 吕伟才 王潜心 编著
刘 辉 邓 健 王新志 姚一飞

GNSS
Principle and Application of Navigation and Positioning



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

第1章 绪 论

不论是早期的航海还是现今的航天,都离不开导航,导航已成为海、陆、空、天各种运动载体不可或缺的指南。随着科技的发展,导航系统除了众所周知的传统导航设备外,又出现了先进的卫星导航。目前,导航系统包括全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)、惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)、无线电导航系统(Radio Navigation System, RNS)、天文导航系统(Celestial Navigation System, CNS)、重力导航(Gravity Navigation)、磁力导航(Magnet Navigation)、地形匹配导航(Terrain Matching Navigation)、影像匹配导航(Image Matching Navigation)等。

本章主要介绍当前的四大全球卫星导航系统的发展和现状、卫星导航系统的组成与作用、GNSS技术的特点和应用等方面的内容,作为后续内容学习的基础。

1.1 卫星导航定位技术简介

1.1.1 空间定位技术的发展

20 世纪上半叶,大地测量处于低潮,它的复苏始于 20 世纪 50 年代。第二次世界大战期间及之后电子学的发展,使大地测量走出了低谷。1957 年 10 月 4 日,苏联在拜科努尔航天发射场用由 P-7 洲际导弹改装的卫星号运载火箭把世界上第一颗人造地球卫星“斯普特尼克 1 号”送入轨道,揭开了人类向太空进军的序幕,激发了世界各国研制和发射卫星的热情。美国于 1958 年 1 月 31 日成功地发射了第一颗人造卫星“探险者 1 号”,法国于 1965 年 11 月 26 日成功地发射了第一颗人造卫星“试验卫星 1 号”,日本于 1970 年 2 月 11 日成功地发射了第一颗人造卫星“大隅”号,中国于 1970 年 4 月 24 日成功地发射了第一颗人造卫星“东方红 1 号”,英国于 1971 年 10 月 28 日成功地发射了第一颗人造卫星“普罗斯帕罗”号。

第一颗人造地球卫星的出现,开创了人类航天新纪元,也为大地测量带来了崭新的面貌,各国开始利用人造地球卫星进行地面点定位以及地球形状、大小和地球重力场测定的工作,即开展卫星大地测量工作。卫星大地测量方法刚一出现,就显示出了它的非凡能力。首先由短期的观测数据求定了精确的地球扁率,接着推证了南北半球的不对称性。

20 世纪 70 年代初,卫星多普勒技术(Satellite Doppler Technology)得到了广泛的应用,使得大地测量定位发生了巨大的变革;海洋卫星测高(Satellite Altimetry, SA)技术,为大地测量应用于海洋学研究开辟了道路;卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)技术,不仅可用于高精度定位,还可以测定地球自转参数和板块运动,推动了地球动力学的发展;激光测月(Lunar Laser Ranging, LLR)技术,可精确测定地球自转参数、月历表偏差、月球天平动参数、引力理论参数等。进入 80 年代,全球定位系统(Global Positioning System,

GPS)得到了全面发展,它具有用途广泛、定位精度高、观测简便及经济效益显著等特点,使得大地测量学发生了一场深刻的技术革命。以上这些卫星测量技术,形成了大地测量学的一个新的分支学科——卫星大地测量学。

20 世纪 60 年代出现了甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)技术,同 SLR 技术一样,它可以测定地球自转参数和板块运动,但更为重要的是,它能以高精度提供地球监测网与似惯性天球参考标架的联系。

卫星大地测量和 VLBI 是应用于大地测量的空间定位技术,因此人们又提出了空间大地测量学(Space Geodesy)这一术语,其内容是卫星大地测量学与 VLBI 的结合,其主体是卫星大地测量学。

大地测量领域出现的空间大地测量技术,使经典大地测量学进入了空间大地测量学的新时代。空间大地测量技术,无论是从测量精度上还是作用范围上,都大大超过了经典大地测量技术。空间大地测量学的兴起,丰富了大地测量学的内容,并展示了新的发展方向。它不仅为测量学科的理论、技术和方法注入了新的内容,而且拓宽了大地测量的用途。它密切了地球物理学、地质学和天文学的联系,并相互渗透,形成了地球外部与深部、区域与全球、时间与空间相结合的新科学。

60 余年来,人造地球卫星技术在军事、通信、气象、资源勘查、导航、遥感、大地测量、地球动力学、天文等众多学科领域得到极其广泛的应用,推动了科学技术的迅猛发展,也丰富了人类的科学文化生活。

1.1.2 GPS 简介

(1) 海军卫星导航系统

第一颗人造卫星上天后,在观测这颗卫星的过程中,美国霍普斯金应用物理实验室的科学家发现了卫星运动引起的多普勒频移效应,断言可以用来实现卫星导航。1958 年年底,美国海军武器实验室开始研制用卫星多普勒技术进行测速、定位的卫星导航系统,叫作海军卫星导航系统(Navy Navigation Satellite System, NNSS)。在该系统中,卫星的轨道都通过地极,故也称“子午(Transit)卫星系统”。

从 1960 年 4 月到 20 世纪 80 年代初美国共发射了 30 多颗卫星。第一颗是“子午仪 1B”号,用来对导航卫星方案及其关键技术进行试验鉴定,并验证双频多普勒测速定位导航原理。1963 年 12 月发射了第一颗实用导航卫星“子午仪 5B-2”号;1964 年 6 月发射了第一颗定位型导航卫星“子午仪 5C-1”号,并交付海军使用;1967 年 7 月“子午仪”卫星导航系统组网实用并允许民用。1972 年美国开始实施“子午仪”改进计划(TIP),共发射 3 颗卫星,主要试验扰动补偿系统,大大提高了轨道预报精度。1981 年 5 月美国发射了经过改进的实用型“子午仪”号卫星(NOVA);1996 年,“子午仪”卫星导航系统退出历史舞台。

1964 年“子午仪”卫星导航系统在美国军方启用,1967 年美国政府批准该系统解密,并提供民用服务。由于该系统不受气象条件的影响,自动化程度较高,且具有良好的定位精度,所以它的出现立即引起了大地测量学者的极大关注;尤其在该系统提供民用服务之后,测量学家在大地测量方面进行了大量的应用研究和实践,并取得了许多令人瞩目的成就。20 世纪 70 年代中期,我国开始引进卫星多普勒接收机,西沙群岛的大地测量基准联测是我国应用卫星多普勒定位技术的先例。陆地、西沙群岛的联测定位表明,用卫星多普勒定位求

得西沙群岛上四个点位的中误差为 ± 2.7 m左右。自80年代初期以来,我国开展了几次较大规模的卫星多普勒定位实践。例如,原国家测绘局和总参测绘局联合测设的全国卫星多普勒大地网,武汉测绘科技大学(现武汉大学)与青海石油管理局、新疆石油管理局、原石油部地球物理勘探局合作测设的西北地区卫星多普勒定位网以及全国陆地海洋卫星定位网。即使在远离我国17 000余千米的南极乔治岛上,也用卫星多普勒定位技术精确测得我国长城站的地理位置为南纬 $62^{\circ}12'59.811'' \pm 0.015''$ 、西经 $50^{\circ}57'52.665'' \pm 0.119''$,高程为 (43.58 ± 0.67) m,南极长城站至北京的距离为17 501 949.51 m。在狂风雪雾下的南极乔治岛上,能如此精确地测得点位,这体现了卫星定位技术的无比优越性。

虽然美国NNSS在导航技术的发展中具有划时代的意义,但是该系统存在的以下缺点,致使其在大地测量学和地球动力学研究方面的应用受到了很大的限制:组网卫星只有6颗,不能达到连续的全球覆盖,因此不能连续提供导航定位数据,两次定位之间的间隔在中纬度地区平均约需1 h;用户的速度误差对定位精度的影响很大,1级速度误差引起约0.25 n mile的定位误差;不能实时定位,每次定位需要10多分钟的跟踪;不能提供三维(经度、纬度和高度)导航数据等。

在美国NNSS的诱导下,苏联海军于1965年开始建立了一个卫星导航系统,称为CICADA。它与NNSS相似,也是第一代卫星导航系统。该系统由12颗宇宙卫星构成CICADA卫星星座。它的高度为1 000 km,卫星的运行周期为105 min,卫星质量为680~700 kg。每颗宇宙卫星发送频率为150 MHz和400 MHz的导航信号,但只有频率为150 MHz的信号作载波来传送导航电文;频率为400 MHz的信号仅用于削弱电离层效应的影响。宇宙卫星每分钟发送3 000 bit的导航电文,每50 bit构成一个导航字码。

研发人员根据NNSS在卫星定位方面取得的初步经验,验证了由卫星系统进行定位的可行性,为GPS的研制做好了铺垫。由于卫星定位显示出其在导航方面的巨大优越性及NNSS在潜艇和舰船导航方面存在的巨大缺陷,美国海陆空三军及民用部门都迫切需要一种新的卫星导航系统。为此,美国海军研究实验室(United States Naval Research Laboratory, NRL)提出了名为Tinmation(由12~18颗卫星组成,高度为10 000 km)的全球定位网计划,并于1967年、1969年和1974年各发射了一颗试验卫星,在这些卫星上初步试验了原子钟计时系统,这是GPS精确定位的基础。而美国空军则提出了621-B计划,该计划包括3~4个星群,每个星群由4~5颗卫星组成。这些卫星中,除1颗采用同步轨道外,其余的都使用周期为24 h的倾斜轨道。该计划以伪随机噪声码(Pseudo Random Noise code, PRN)为基础传播卫星测距信号,即使信号密度低于环境噪声的1%也能将其检测出来。伪随机码的成功运用是GPS得以成功的一个重要基础。海军的计划主要为舰船提供低动态的二维定位;空军的计划能提供高动态服务,但其系统过于复杂。由于同时研制两个系统会产生巨大的费用,而且这两个计划都是为了提供全球定位而设计的,因此,1973年12月美国国防部将两者合二为一,并由国防部牵头的卫星导航定位联合计划局(JPO)领导,由陆海空三军联合研制一种新的军用卫星导航系统——NAVSTAR GPS,其英文全称为NAVigation by Satellite Timing And Ranging(NAVSTAR)/Global Positioning System (GPS),我们称之为GPS全球定位系统,简称GPS。它是一种被动式卫星导航系统,是一种以空间卫星为基础的无线电导航与定位系统,能为世界上任何地方,包括空中、陆地、海洋甚至外层空间的用戶,全天候、全时间、连续地提供精确的三维位置、三维速度以及时间信息,具有实时

性的导航、定位和授时功能。

(2) GPS 全球定位系统的建立

最初的 GPS 计划是在联合计划局的领导下诞生的,该方案将 24 颗卫星布置在互呈 120° 的 6 个轨道上,每个轨道上有 4 颗卫星,在地球上任何一点均能观测到 6~9 颗卫星。这样,粗码精度可达 100 m,精码精度为 10 m。由于预算紧缩,联合计划局减少了发射卫星的数量,改为将 18 颗卫星分布在互呈 60° 的 6 个轨道上。然而这一方案不能确保卫星的可靠性,1988 年联合计划局又进行了最后一次修改:在互呈 30° 的 6 条轨道上布置 21 颗工作卫星和 3 颗备用卫星,这也是现在 GPS 卫星所使用的工作方式。图 1-1 为 GPS 星座标准配置图。

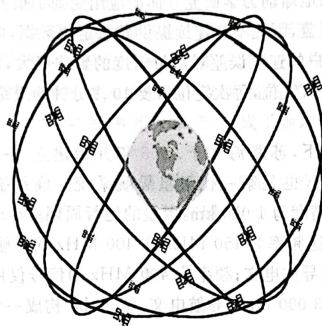


图 1-1 GPS 星座

GPS 计划的实施共分三个阶段:

第一阶段为方案论证和初步设计阶段。从 1978 年到 1979 年,由位于加利福尼亚的范登堡空军基地采用双子座火箭发射 4 颗试验卫星,卫星运行轨道长半轴长度为 26 560 km,倾角为 64° ,轨道高度为 20 000 km。这一阶段主要研制了地面接收机及建立了地面跟踪网,结果令人满意。

第二阶段为全面研制和试验阶段。从 1979 年到 1984 年,又陆续发射了 7 颗称为 BLOCK I 的试验卫星,研制了各种用途的接收机。试验表明,GPS 定位精度远远超过设计标准,利用粗码定位,其精度就可达 14 m。

第三阶段为实用组网阶段。1989 年 2 月 4 日第一颗 GPS 工作卫星发射成功,宣告 GPS 进入工程建设状态,这一阶段的卫星称为 BLOCK II 和 BLOCK II-A。1993 年年底 GPS 网[即(21+3)GPS 星座]已经建成,其后根据计划更换失效的卫星。

目前(2020 年 7 月 31 日)在轨 GPS 卫星共有 33 颗,其中工作卫星 31 颗,1 颗卫星处于维护状态,1 颗卫星处于退役状态。33 颗卫星中,II R-M 型卫星 8 颗、II-F 型卫星 12 颗、II-R 型卫星 11 颗、II-A 型卫星 1 颗、III-A 型卫星 1 颗(见表 1-1)。

表 1-1 GPS 星座现状(2020 年 7 月 31 日)

Plane	Slot	PRN	NORAD	Type SC	Launch date	Input date	Life time /months
A	1	24	38833	II-F	04.10.12	14.11.12	86.7
	2	31	29486	II-R-M	25.09.06	13.10.06	159.8
	3	30	39533	II-F	21.02.14	30.05.14	68.2
	4	7	32711	II-R-M	15.03.08	24.03.08	142.4
	6	4	43873	III-A	23.12.18	13.01.20	0.7
B	1	16	27663	II-R	29.01.03	18.02.03	203.6
	2	25	36585	II-F	28.05.10	27.08.10	113.3
	3	28	26407	II-R	16.07.00	17.08.00	233.7
	4	12	29601	II-R-M	17.11.06	13.12.06	157.8
	5	26	40534	II-F	25.03.15	20.04.15	57.5
	6		34661	II-R-M	24.03.09		
C	1	29	32384	II-R-M	20.12.07	02.01.08	145.1
	2	27	39166	II-F	15.05.13	21.06.13	79.5
	3	8	40730	II-F	15.07.15	12.08.15	53.8
	4	17	28874	II-R-M	26.09.05	13.11.05	170.8
	5	19	28190	II-R	20.03.04	05.04.04	190.1
D	1	2	28474	II-R	06.11.04	22.11.04	182.5
	2	1	37753	II-F	16.07.11	14.10.11	99.7
	3	21	27704	II-R	31.03.03	12.04.03	201.9
	4	6	39741	II-F	17.05.14	10.06.14	67.8
	5	11	25933	II-R	07.10.99	03.01.00	241.2
	6	18	22877	II-A	26.10.93	22.11.93	310.8
E	1	3	40294	II-F	29.10.14	12.12.14	61.7
	2	10	41019	II-F	30.10.15	09.12.15	49.8
	3	5	35752	II-R-M	17.08.09	27.08.09	125.3
	4	20	26360	II-R	11.05.00	01.06.00	236.2
	6	22	28129	II-R	21.12.03	12.01.04	192.8
F	1	32	41328	II-F	05.02.16	09.03.16	46.8
	2	15	32260	II-R-M	17.10.07	31.10.07	147.2
	3	9	40105	II-F	02.08.14	17.09.14	64.6
	4	23	28361	II-R	23.06.04	09.07.04	186.9
	5	14	26605	II-R	10.11.00	10.12.00	229.9
	6	13	24876	II-R	23.07.97	31.01.98	264.2

资料来源: <https://www.glonass-iac.ru/en/GPS/index.php>.

(3) GPS 现代化

GPS 是当今世界上功能最强、性能最好、应用最广泛的天基导航系统之一,不管是和平

年代的日常活动,还是战时军事行动,美国都离不开 GPS,但其在应用过程中暴露出了一些问题:容易受到干扰、安全性较差、使用不可控。因此,1998 年美国副总统戈尔提出了 GPS 现代化这一概念,其实质是要加强 GPS 对美军现代化战争的支撑和保持美国在全球民用导航领域的领导地位。GPS 现代化包括军事和民用两部分。GPS 现代化的军事部分包括 4 项措施:增加 GPS 卫星发射的信号强度,以增强抗电子干扰能力;增加具有更好的保密性和安全性的新的军用码(M 码),并与民用码分开;军用接收设备比民用的有更好的保护装置,特别是抗干扰能力和快速初始化能力;创新技术,以阻止或干扰敌方使用 GPS。GPS 现代化的民用部分包括 3 项措施:在一年一度的评估基础上,决定是否将 SA 信号强度降为零(已于 2000 年 5 月 1 日零点取消了 SA);在 L2 频率上增加第二民用码(即 C/A 码),这样有利于提高定位精度和进行电离层改正;增加 L5 民用频率,这有利于提高民用实时定位的精度和导航的安全性。

美国国防部制订了具体的现代化计划,包括采购性能更好的新型 GPS 卫星、对地面运行控制系统进行改造、采购 M 码信号接收机等,以期大幅提升 GPS 的各项性能。该计划全面覆盖 GPS 的 3 个组成部分:采购 GPS II-F、GPS III 卫星替换整个星座;升级改造地面控制系统;研制开发新型军用接收机。2012~2016 年间总投资约 73 亿美元,在随后的 15 年,还需投资约 150 亿美元。到 2030 年全部计划完成时,将实现 GPS 的全面升级,有效提升系统在干扰环境下的性能。

① 空间卫星的替换。GPS II-F 和 GPS III 是能播发 M 码信号的新型卫星。计划发射 12 颗 GPS II-F 卫星(目前已发射完毕);2014~2018 年间发射 8 颗 GPS III-A 卫星(到目前实际仅发射 1 颗);2018~2024 年间发射 16 颗 GPS III-B 卫星;2025~2030 年间发射 8 颗 GPS III-C 卫星。

② 地面控制系统的升级改造。只更新 GPS 卫星星座,是不可能全面提升 GPS 的抗干扰能力和其他性能的。因此,升级改造地面控制系统,提高其对新型卫星的运行控制能力是十分必要的。地面控制系统升级后应具备的能力是:能监控所有在轨运行卫星播发的军用 M 码信号;可以连续更新卫星播发的时间和卫星位置校正信息(目前的系统每天只能更新 1 次);能够有效控制 GPS III-C 卫星“点波束功率增强”天线(GPS III-C 卫星配备一个大型天线,可实现地面上指定区域的功率增强,即“点波束功率增强”)。为了提高控制精度,适应 GPS 现代化的需要,GPS 地面控制站已经增加到 12 个,并最终将达到 19 个,分布在世界各地,以保证在全球范围内对每颗在轨卫星至少有两个站对其实施连续的实时跟踪观测。

③ 新型军用接收机的研发。美国国防部在 2013 年完成了样机研制,2016 年开始各种武器平台的应用测试工作。

GPS 现代化最具标志性的成果是 2009 年 4 月实现了 GPS 卫星 L5 频率的发射。这意味着 GPS 用户可以收到 3 个频率(L1、L2、L5)的导航无线电信号,有更完善的电离层改正,更好的定位、定时和导航的可靠性和精度。此外,与已有的 GPS 民用导航码相比, L5 有较高的芯片运行速率,可以进行更精确的码和相位测量。

GPS 现代化计划的全面实施,将使 GPS 的生存能力及各种性能得到非常显著的增强,美军武器装备的作战效能、部队的整体战斗力会有大幅提升。

1.1.3 GLONASS 简介

1960 年晚些时候,当时已有的卫星导航系统不能达到导航定位的目的。苏联军方确认需要一个卫星无线电导航系统(SRNS)用于规划中的新一代弹道导弹的精确导引。1968~1969 年,苏联国防部、科学院和海军的一些研究所联合起来要为海、陆、空、天武装力量建立一个单一的解决方案。1970 年,这个系统的需求文件编制完成,进一步研究之后,苏联颁布法令建立 GLONASS(GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema)全球卫星导航系统(GLObal NAVigation Satellite System)。

GLONASS 的起步晚于 GPS。从苏联 1982 年 10 月 12 日发射第一颗 GLONASS 卫星开始,到 1996 年,十几年时间内历经周折,虽然遭遇了苏联的解体,由俄罗斯接替部署,但始终没有终止或中断 GLONASS 卫星的发射。

1995 年年初只有 16 颗 GLONASS 卫星在轨工作,1995 年又进行了三次成功发射,将 9 颗卫星送入轨道,完成了 24 颗工作卫星加 1 颗备用卫星的布局。经过数据加载、调整和检验,1996 年 1 月 18 日整个系统开始正常运行。

按照设计,GLONASS 星座由中轨道的 24 颗卫星组成,包括 21 颗工作卫星和 3 颗备用卫星,分布于 3 个圆形轨道面上,轨道高度为 19 100 km,倾角为 64.8° ,绕地运行周期约 11 小时 15 分钟 44 秒,地迹重复周期为 8 天,轨道同步周期为 17 圈。由于 GLONASS 卫星的轨道倾角大于 GPS 卫星的轨道倾角,所以它在高纬度(50° 以上)地区的可视性较好。与 GPS 不同,GLONASS 使用频分多址(FDMA)的方式,每颗 GLONASS 卫星广播两种信号: L1 和 L2 信号。具体来说,频率分别为 $L1 = 1\,602 + 0.562\,5 \times k$ (MHz) 和 $L2 = 1\,246 + 0.437\,5 \times k$ (MHz),其中 k 为 1~24 颗卫星的频率编号,同一颗卫星满足 $L1/L2 = 9/7$ 。图 1-2 为 GLONASS 星座标准配置图。

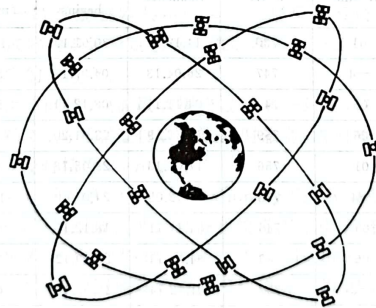


图 1-2 GLONASS 星座

GLONASS 标准配置为 24 颗卫星,而 18 颗卫星就能保证该系统为俄罗斯境内用户提供全部服务。该系统卫星分为“GLONASS”和“GLONASS-M”两种类型,后者使用寿命更长,可达 7 a。研制中的“GLONASS-K”卫星的在轨工作时间可长达 10~12 a。

GLONASS 一开始就没有加 SA 干扰,所以其民用精度优于加 SA 的 GPS。不过,其应

用普及情况远不及 GPS,这主要是俄罗斯没有开发民用市场。另外, GLONASS 卫星平均在轨的寿命较短,且由于俄罗斯经济困难无力补网,在轨可用卫星少,不能独立组网。2003 年的伊拉克战争对俄罗斯产生了相当大的震动,迫使俄罗斯领导层再次对太空的军事设施重视起来。

俄罗斯已经着手 GLONASS 现代化的工作。俄罗斯太空部队进行了新一代 GLONASS-M 计划的飞行试验,新型卫星除了有更长的设计寿命以外,还具有更好的信号特性。俄罗斯还计划研发低质量(MASS)的第三代 GLONASS-K 卫星,确保卫星工作寿命在 10 a 以上。

莫斯科时间 2011 年 11 月 4 日 16 时 51 分(北京时间 20 时 51 分),俄罗斯航天部门使用一枚“质子-M”重型运载火箭,将 3 颗“GLONASS-M”全球导航卫星成功送入太空。俄航天署署长波波夫金说,该系统在轨卫星群已有 28 颗卫星,达到了设计水平。随着地面设施的发展, GLONASS 现代化工作在 2019 年全部完成,其定位和导航误差范围达到 1 m 左右,就精度而言该系统处于全球领先地位。

俄罗斯联邦航天局于 2013 年 1 月 12 日发布了一份名为《俄罗斯 2013 至 2020 空间活动》的文件,宣布从当时起至 2020 年将建造并发射 13 颗 GLONASS-M 卫星和 22 颗 GLONASS-K 卫星, GLONASS 的定位精度在 2015 年达到 1.4 m,在 2020 年达到 0.6 m,以满足 GLONASS 现代化建设的需要。

目前(2020 年 7 月 31 日)在轨的 GLONASS 卫星共有 28 颗,其中工作卫星 23 颗,3 颗卫星处于维护状态,1 颗卫星处于备用状态,1 颗卫星处于测试状态(见表 1-2)。

表 1-2 GLONASS 星座现状(2020 年 7 月 31 日)

Orb. slot	Orb. pl.	RF chnl	# GC	Launched	Operation begins	Life-time /months	In ephemeris (UTC)
1	1	01	730	14.12.09	30.01.10	121.7	+ 01:18 02.02.20
2	1	-4	747	26.04.13	04.07.13	81.3	+ 01:18 02.02.20
3	1	05	744	04.11.11	08.12.11	99.0	+ 01:18 02.02.20
4	1	06	759	11.12.19	03.01.20	1.7	+ 01:18 02.02.20
5	1	01	756	17.06.18	29.08.18	19.6	+ 01:18 02.02.20
6	1	-4	733	14.12.09	24.01.10	121.7	+ 01:18 02.02.20
7	1	05	745	04.11.11	18.12.11	99.0	+ 01:18 02.02.20
8	1	06	743	04.11.11	20.09.12	99.0	+ 01:18 02.02.20
9	2	-2	702	01.12.14	15.02.16	62.1	+ 01:18 02.02.20
10	2	-5	723	25.12.07	22.01.08	145.4	+ 01:18 02.02.20
11	2	00	753	29.05.16	27.06.16	44.2	+ 01:18 02.02.20
12	2	-1	758	27.05.19	22.06.19	8.3	+ 01:18 02.02.20
13	2	-2	721	25.12.07	08.02.08	145.4	+ 01:18 02.02.20
14	2	-7	752	22.09.17	16.10.17	28.4	+ 01:18 02.02.20
15	2	00	757	03.11.18	27.11.18	15.0	+ 01:18 02.02.20

表 1-2(续)

Orb. slot	Orb. pl.	RF chnl	# GC	Launched	Operation begins	Life time /months	In ephemeris (UTC)
16	2	-1	736	02.09.10	04.10.10	113.1	+ 01;18 02.02.20
17	3	04	751	07.02.16	28.02.16	47.9	+ 01;18 02.02.20
18	3	-3	754	24.03.14	14.04.14	70.4	+ 01;18 02.02.20
19	3	03	720	26.10.07	25.11.07	147.4	+ 01;18 02.02.20
20	3	02	719	26.10.07	27.11.07	147.4	+ 01;18 02.02.20
21	3	04	755	14.06.14	03.08.14	67.7	+ 01;18 02.02.20
22	3	-3	731	02.03.10	28.03.10	119.1	+ 01;18 02.02.20
23	3	03	732	02.03.10	28.03.10	119.1	+ 01;18 02.02.20
24	3	02	735	02.03.10	28.03.10	119.1	- 01;18 02.02.20
4	1		742	02.10.11	25.10.11	100.1	
15	2		716	25.12.06	12.10.07	157.4	
10	2		717	25.12.06	03.04.07	157.4	
20	3	-6	701	26.02.11		107.3	

资料来源: <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/index.php>.

1.1.4 BDS 简介

(1) 系统概述

北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)是中国自主建设、独立运行并与世界其他卫星导航系统兼容共用的全球卫星导航系统;是继美国 GPS、俄罗斯 GLONASS 之后第三个成熟的卫星导航系统。BDS 和 GPS、GLONASS、GALILEO 是联合国卫星导航委员会已认定的供应商。

北斗卫星导航系统由空间段、地面段和用户段三部分组成,可在全球范围内全天候、全天时为各类用户提供高精度、高可靠定位、导航、授时服务,并具短报文通信能力,定位精度 10 m,测速精度 0.2 m/s,授时精度 20 ns。

空间星座部分由 5 颗地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星和 30 颗非地球静止轨道(Non-GEO)卫星组成。非地球静止轨道卫星由 27 颗中圆地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星和 3 颗倾斜地球同步轨道(Inclined Geosynchronous Satellite Orbit, IGSO)卫星组成。其中,中圆地球轨道卫星轨道高度为 21 500 km,轨道倾角为 55°,均匀分布在 3 个轨道面上;倾斜地球同步轨道卫星轨道高度为 36 000 km,均匀分布在 3 个倾斜同步轨道面上,轨道倾角为 55°,3 颗倾斜地球同步轨道卫星星下点轨迹重合,交叉点经度为东经 118°,相位差为 120°。图 1-3 为 BDS 星座图。

地面控制部分由若干主控站、注入站和监测站组成。主控站的主要任务是收集各个监测站的观测数据,进行数据处理,生成卫星导航电文、广域差分信息和完好性信息,完成任务规划与调度,实现系统运行控制与管理等;注入站的主要任务是在主控站的统一调度下,完成卫星导航电文、广域差分信息和完好性信息注入,以及对有效载荷进行控制管理;监测站

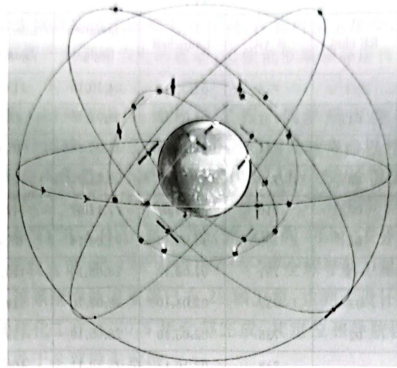


图 1-3 BDS 星座

对导航卫星进行连续跟踪监测,接收导航信号,发送给主控站,为卫星轨道的确定和时间同步提供观测数据。

用户终端部分由各类“北斗”用户终端以及与其他卫星导航系统兼容的终端组成,能够满足不同领域和行业的应用需求。

北斗卫星导航系统时间基准采用北斗时(BDT),是一个连续的时间系统,秒长为国际单位制(SI)秒,起始历元为 2006 年 1 月 1 日 00:00 协调世界时(UTC)。北斗时与协调世界时的偏差保持在 100 ns 以内。北斗卫星导航系统的坐标框架采用中国 2000 大地坐标系(CGCS2000)。

北斗卫星导航系统为全球用户提供卫星定位、导航和授时服务,并为我国及周边地区用户提供定位精度为 1 m 的广域差分服务和 120 个汉字/次的短报文通信服务。其主要功能以及性能指标如下:

- ① 主要功能:定位、测速、单双向授时、短报文通信。
- ② 服务区域:全球。
- ③ 定位精度:优于 10 m。
- ④ 测速精度:优于 0.2 m/s。
- ⑤ 授时精度:20 ns。

(2) 系统发展

按照“质量、安全、应用、效益”的总要求,坚持“自主、开放、兼容、渐进”的发展原则,遵循“先区域、后全球”的总体思路,北斗卫星导航系统根据“三步走”的发展战略稳步推进,具体发展步骤如下:

第一步,北斗卫星导航试验系统。

我国早在 20 世纪 60 年代末就开展了卫星导航系统的研制工作,70 年代初开始研究卫星导航系统的技术和方案,但之后这项名为“灯塔”的研究计划被取消。自 70 年代后期以来,国内开展了适合国情的卫星导航系统的方案研究,先后提出过单星、双星、三星和 3~5 星

的区域性系统方案以及多星的全球系统的设想,并考虑导航定位与通信等综合运用问题,但由于种种原因,这些方案和设想都没能得以实现。我国的北斗卫星导航试验系统(北斗一号)是20世纪80年代提出的“双星快速定位系统”发展计划。方案于1983年被提出,1994年中国启动北斗卫星导航试验系统建设工作;2000年10月31日和12月21日相继发射2颗北斗导航试验卫星,初步建成北斗卫星导航试验系统,成为世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家;2003年发射第3颗北斗导航试验卫星,进一步增强了北斗卫星导航试验系统的性能。

北斗卫星导航试验系统空间星座部分包括3颗地球静止轨道卫星,分别定点于东经 80° 、 110.5° 和 140° 赤道上空。地面控制部分由地面控制中心和若干标校站组成,地面控制中心主要完成卫星轨道的确定、电离层的校正、用户位置的确定及用户短报文信息交换等处理任务;标校站主要为地面控制中心提供距离观测量和校正参数。用户终端部分由手持型、车载型和指挥型等各种类型的终端组成,具有定位申请发射和位置坐标信息接收等功能。

北斗卫星导航试验系统主要功能和性能指标如下:

① 主要功能:定位、单双向授时、短报文通信。

② 服务区域:中国及周边地区。

③ 定位精度:优于20 m。

④ 授时精度:单向100 ns,双向20 ns。

⑤ 短报文通信:120个汉字/次。

第二步,北斗卫星导航区域系统。

2004年中国启动北斗卫星导航系统工程建设工作,2012年年底完成5颗GEO卫星、5颗IGSO卫星和4颗MEO卫星的发射,具备区域服务能力。

北斗卫星导航区域系统的主要功能和性能指标如下:

① 主要功能:定位、测速、单双向授时、短报文通信。

② 服务区域:中国及周边地区。

③ 定位精度:平面10 m,高程10 m。

④ 测速精度:优于0.2 m/s。

⑤ 授时精度:单向50 ns。

⑥ 短报文通信:120个汉字/次。

第三步,2020年全面建成北斗卫星导航系统,形成全球服务能力。

2020年7月31日,习近平总书记向世界宣布北斗三号全球卫星导航系统正式开通,标志着北斗“三步走”的发展战略圆满完成,北斗迈进全球服务新时代。2020年8月3日上午,北斗三号全球卫星导航系统建成开通新闻发布会在国务院新闻办公室召开。

“北斗三号”具备导航定位和通信数传两大功能,可提供定位导航授时、全球短报文通信、区域短报文通信、国际搜救、星基增强、地基增强、精密单点定位共7类服务,是功能强大的全球卫星导航系统。全球范围定位精度优于10 m、测速精度优于0.2 m/s、授时精度优于20 ns、服务可用性优于99%;区域通信能力达到14 000 bit(1 000个汉字)/次,既能传输文字,还能传输语音和图片,并支持560 bit(40个汉字)/次的全球通信能力。

(3) 系统现状

为鼓励国内外相关企业参与北斗应用终端研发,推动北斗广泛应用,中国卫星导航系统

管理办公室于 2012 年 12 月 27 日公布了北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件——公开服务信号 B1I(1.0 版)。该文件定义了北斗卫星导航系统公开服务信号 B1I 的卫星与用户终端之间的接口关系,明确了北斗卫星导航系统所采用的坐标系统和时间系统,规范了 B1I 信号结构和基本特性参数以及测距码等相关内容,给出了北斗导航电文,是开发制造接收终端和芯片所必备的文件。

2013 年 12 月 27 日,北斗卫星导航系统正式提供区域服务一周年新闻发布会在国务院新闻办公室新闻发布厅召开,正式发布了《北斗系统公开服务性能规范(1.0 版)》和《北斗系统空间信号接口控制文件(2.0 版)》两个系统文件。

2014 年 11 月 23 日,国际海事组织海上安全委员会审议通过了对北斗卫星导航系统认可的航行安全通函,这标志着北斗卫星导航系统正式成为全球无线电导航系统的组成部分,取得面向海事应用的国际合法地位。

2017 年 11 月 5 日,中国第三代导航卫星——北斗三号的首批组网卫星(2 颗)以“一箭双星”的发射方式顺利升空,标志着中国正式开始建造北斗全球卫星导航系统。

2020 年 6 月 23 日,北斗卫星导航系统第 55 颗卫星在西昌卫星发射中心成功发射,7 月 31 日北斗三号全球卫星导航系统建成暨开通仪式在人民大会堂举行。

截至 2020 年 7 月 31 日,BDS 已发射导航试验卫星(BDS-1)4 颗、BDS-2 卫星 20 颗、BDS-3s 卫星 5 颗、BDS-3 卫星 30 颗(参见表 1-3),已具备全球导航定位服务能力。

表 1-3 北斗卫星导航系统卫星发射情况(2020 年 7 月 31 日)

发射时间	卫星编号	轨道	卫星类型
2000 年 10 月 31 日	第 1 颗北斗导航试验卫星	GEO	BDS-1
2000 年 12 月 21 日	第 2 颗北斗导航试验卫星	GEO	BDS-1
2003 年 5 月 25 日	第 3 颗北斗导航试验卫星	GEO	BDS-1
2007 年 2 月 3 日	第 4 颗北斗导航试验卫星	GEO	BDS-1
2007 年 4 月 14 日	第 1 颗北斗导航卫星	MEO	BDS-2
2009 年 4 月 15 日	第 2 颗北斗导航卫星	GEO	BDS-2
2010 年 1 月 17 日	第 3 颗北斗导航卫星	GEO	BDS-2
2010 年 6 月 2 日	第 4 颗北斗导航卫星	GEO	BDS-2
2010 年 8 月 1 日	第 5 颗北斗导航卫星	IGSO	BDS-2
2010 年 11 月 1 日	第 6 颗北斗导航卫星	GEO	BDS-2
2010 年 12 月 18 日	第 7 颗北斗导航卫星	IGSO	BDS-2
2011 年 4 月 10 日	第 8 颗北斗导航卫星	IGSO	BDS-2
2011 年 7 月 27 日	第 9 颗北斗导航卫星	IGSO	BDS-2
2011 年 12 月 2 日	第 10 颗北斗导航卫星	IGSO	BDS-2
2012 年 2 月 25 日	第 11 颗北斗导航卫星	GEO	BDS-2
2012 年 4 月 30 日	第 12、13 颗北斗导航卫星	MEO	BDS-2
2012 年 9 月 19 日	第 14、15 颗北斗导航卫星	MEO	BDS-2
2012 年 10 月 25 日	第 16 颗北斗导航卫星	GEO	BDS-2
2015 年 3 月 30 日	第 17 颗北斗导航卫星	IGSO	BDS-3s
2015 年 7 月 25 日	第 18、19 颗北斗导航卫星	MEO	BDS-3s
2015 年 9 月 30 日	第 20 颗北斗导航卫星	IGSO	BDS-3s

表 1-3(续)

发射时间	卫星编号	轨道	卫星类型
2016年2月1日	第21颗北斗导航卫星	MEO	BDS-3s
2016年3月30日	第22颗北斗导航卫星	IGSO	BDS-2
2016年6月12日	第23颗北斗导航卫星	GEO	BDS-2
2017年11月5日	第24、25颗北斗导航卫星	MEO	BDS-3
2018年1月12日	第26、27颗北斗导航卫星	MEO	BDS-3
2018年2月12日	第28、29颗北斗导航卫星	MEO	BDS-3
2018年3月30日	第30、31颗北斗导航卫星	MEO	BDS-3
2018年7月10日	第32颗北斗导航卫星	IGSO	BDS-2
2018年7月29日	第33、34颗北斗导航卫星	MEO	BDS-3
2018年8月25日	第35、36颗北斗导航卫星	MEO	BDS-3
2018年9月19日	第37、38颗北斗导航卫星	MEO	BDS-3
2018年10月15日	第39、40颗北斗导航卫星	MEO	BDS-3
2018年11月1日	第41颗北斗导航卫星	GEO	BDS-3
2018年11月19日	第42、43颗北斗导航卫星	MEO	BDS-3
2019年4月20日	第44颗北斗导航卫星	IGSO	BDS-3
2019年5月17日	第45颗北斗导航卫星	GEO	BDS-2
2019年6月25日	第46颗北斗导航卫星	IGSO	BDS-3
2019年9月23日	第47、48颗北斗导航卫星	MEO	BDS-3
2019年11月5日	第49颗北斗导航卫星	IGSO	BDS-3
2019年11月23日	第50、51颗北斗导航卫星	MEO	BDS-3
2019年12月16日	第52、53颗北斗导航卫星	MEO	BDS-3
2020年3月9日	第54颗北斗导航卫星	GEO	BDS-3
2020年6月23日	第55颗北斗导航卫星	GEO	BDS-3

资料来源: <http://www.cno-tarc.cn/system/constellation>。

(4) 系统应用

自2003年北斗卫星导航试验系统正式提供服务以来,我国的卫星导航在理论研究、应用技术研究、接收机制造及应用与服务等方面取得了长足进步。随着北斗卫星导航系统建设和无源导航定位服务能力的发展,我国的北斗卫星导航系统在交通运输、海洋渔业、水文监测、气象测报、森林防火、通信时统、电力调度、救灾减灾和国家安全等诸多领域得到了广泛应用,产生了显著的社会效益和经济效益。

① 在交通运输方面,北斗卫星导航系统广泛应用于重点运输过程监控管理、公路基础设施安全监控、港口高精度设施定位调度监控等领域。

② 在海洋渔业方面,基于北斗卫星导航系统的海洋渔业综合信息服务平台,为渔业管理部门提供船位监控、紧急救援、信息发布、渔船出入港管理等服务。

③ 在水文监测方面,北斗卫星导航系统成功应用于多山地域水文测报信息的实时传输,可提高灾情预报的准确性,为制定防洪抗旱调度方案提供重要保障。

④ 在气象测报方面,我国成功研制一系列气象测报型北斗终端设备,启动“大气海洋和

空间监测预警示范应用”项目,形成实用可行的系统应用解决方案,解决气象站之间的数字报文自动传输问题。

⑤ 在森林防火方面,北斗卫星导航系统成功应用于森林防火,定位与短报文通信功能在实际应用中发挥了较大作用。

⑥ 在通信时统方面,应用北斗卫星导航系统成功开展北斗双向授时应用示范,突破光纤拉远等关键技术,研制出一体化卫星授时系统。

⑦ 在电力调度方面,应用北斗卫星导航系统成功开展电力时间同步应用示范,为电力事故分析、电力预警系统和保护系统等建立高精度时间应用创造了条件。

⑧ 在救灾减灾方面,基于北斗卫星导航系统的导航定位、短报文通信以及位置报告功能,提供全国范围的实时救灾指挥调度、应急通信、灾情信息快速上报与共享等服务,能显著提高灾害应急救援的快速反应能力和决策能力。

北斗卫星导航系统还可以为民航、航运、铁路、金融、邮政、国土资源、农业、旅游等行业提供更高性能的定位、导航、授时和短报文通信服务。

北斗卫星导航系统的快速发展,得益于中国综合国力的提升和经济持续发展。中国将一如既往地推动卫星导航系统建设和产业发展,鼓励运用卫星导航新技术,不断拓展应用领域,满足人们不断增长的多样化需求;积极推动国际交流与合作,实现北斗卫星导航系统与世界其他卫星导航系统的兼容与互操作,为全球用户提供高性能、高可靠的定位、导航与授时服务。

1.1.5 GALILEO 简介

伽利略卫星导航系统(GALILEO Satellite Navigation System, GALILEO)是欧洲正在实施的一项重大民用航天项目,于 20 世纪 90 年代由欧盟委员会和欧空局共同发起,其目标是建成欧洲自主的民用全球卫星导航系统,并与美国的 GPS 和俄罗斯的 GLONASS 相兼容。在使欧洲获得工业和商业效益的同时,它将为建立欧洲共同安全防务体系提供基础条件。

1.1.5.1 伽利略计划概况

1999 年 2 月 10 日,欧盟在《伽利略—欧洲参与新一代卫星导航服务》的报告中,首次提出比较可行的欧洲全球卫星导航定位系统计划——伽利略计划。2002 年 3 月 26 日,在布鲁塞尔召开的欧盟交通部长会议,表决通过了为该项目划拨 4.5 亿欧元研究经费,标志着伽利略计划正式启动。

整个伽利略卫星导航系统主要包括全球构成、任务支持、卫星服务、用户段及外部系统,全球构成的核心是基础设施,分为空间段、地面控制段和地面任务段。在 2010 年 1 月欧盟委员会的一份报告中,重新调整了伽利略计划正式运行的时间节点。根据新的时间节点,该计划从启动到实现运营的 4 个发展阶段如下:

- ① 2002~2005 年为定义阶段,论证计划的必要性、可行性及具体实施措施。
- ② 2005~2011 年为在轨验证阶段,其任务是成功研制、实施和验证伽利略空间段及地面段设施,进行系统在轨验证。
- ③ 2011~2014 年为全面部署阶段,包括制造和发射正式运行的卫星,建成整个地面基础设施。
- ④ 2014 年之后为开发利用阶段,提供运营服务,按计划更新卫星并进行系统维护等。

实际上,由于多方面原因,伽利略计划一再滞后。

1.1.5.2 GALILEO 构成

GALILEO 的基本结构包括空间星座、地面监控设施、服务中心、用户接收机等。

GALILEO 由如下几个主要部分组成。

(1) 空间星座部分

如图 1-4 所示,GALILEO 空间卫星星座由 30 颗中轨道卫星(MEO)组成。卫星均匀地分布在高度约为 23 616 km 的 3 个轨道面上,每个轨道面上有 10 颗卫星,其中包括 1 颗备用卫星,轨道倾角为 56° ,卫星绕地球一周约需 14 小时 4 分钟,这样的布设可以满足全球无缝隙导航定位。卫星的设计寿命为 20 a,每颗卫星都将搭载导航载荷和一台搜救转发器。卫星发射采用一箭多星的发射方式,每次发射可以把 5 颗或 6 颗卫星同时送入轨道。卫星的主要技术参数见表 1-4。

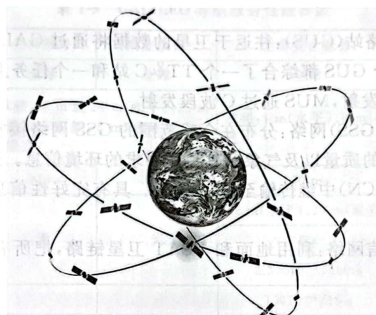


图 1-4 GALILEO 星座

表 1-4 GALILEO 卫星的技术参数

卫星参数	参数值
每轨道卫星个数	10(9 颗工作、1 颗备用)
卫星分布轨道面数	3
卫星总数	30 颗(27 颗工作、3 颗备用)
轨道倾角	56°
轨道高度	23 616 km
运行周期	14 小时 4 分钟
卫星寿命	20 a
卫星质量	675 kg
电量供应	1.5 kW
射电频率	1 202.025 MHz
	1 278.750 MHz
	1 561.098 MHz
	1 589.742 MHz

截至 2016 年 12 月, GALILEO 已经发射了 18 颗工作卫星, 具备了早期操作能力(EOC); 2017 年 12 月 13 日, GALILEO 的第 19~22 颗卫星由一枚阿丽亚娜 5 型火箭从法属圭亚那库鲁航天发射中心发射成功, 全部 30 颗卫星(调整为 24 颗工作卫星, 6 颗备用卫星)计划于 2020 年发射完毕。

(2) 地面控制部分

地面控制部分的两大功能包括导航控制与星座维护以及完好性监控。地面控制部分的构成如下。

两个控制中心(GCC); 两个控制中心是地面控制部分的核心, 分别位于法国和意大利。GCC 的功能是控制星座, 保证卫星原子钟的同步, 进行完好性信号及内、外部数据的处理, 监控卫星及由它们提供的服务。GCC 由轨道同步与处理设施(OSPF)、精确授时设施(PTF)、完好性处理设施(IPF)、任务控制设施(MCF)、卫星控制设施(SCF)、服务产品设施(SPF)等设施组成。

GALILEO 上行链路站(GUS); 往返于卫星的数据将通过 GALILEO 上行链路站的全局网络来传输, 其中每个 GUS 都综合了一个 TT&C 站和一个任务上行站(MUS)。TT&C 站上行链路通过 S 波段发射, MUS 通过 C 波段发射。

GALILEO 监测站(GSS)网络; 分布在全球范围的 GSS 网络接收卫星导航信息(SIS), 并且检测卫星导航信号的质量以及气象和其他所要求的环境信息。这些站收到的信息将通过 GALILEO 通信网(GCN)中继传输至两个 GCC。具有完好性信息是 GALILEO 与其他 GNSS 的主要区别。

GALILEO 全球通信网络; 利用地面和 VSAT 卫星链路, 把所有地面站和地面设施连接起来。

(3) 区域设施部分

区域设施部分由完好性监测站(IMS)网络、完好性控制中心(ICC)和完好性注入站(IJLS)组成。区域范围内服务的提供者可独立使用 GALILEO 提供的完好性上行链路通道发布区域完好性数据, 这将确保每个用户能够收到至少由两颗仰角在 25° 以上的卫星提供的完好性信号。全球最多可设 8 个区域性地面设施。在欧洲以外的地区由专门对该地区 GALILEO 进行完好性监测的地面站组成独立区域设施, 区域服务供应商负责投资、部署和运营。

(4) 局域设施部分

GALILEO 局域设施部分将根据当地的需要, 增强系统的性能, 例如在某些地区(如机场、港口、铁路枢纽和城市市区)提供特别的精确性和完好性, 以及为室内用户提供导航服务。局域设备需要确保完好性检测、数据的处理和发射。将数据传输至用户接收机既可以通过特别的链路, 也可以不通过 GALILEO, 而采用如 GSM 或 UMTS 标准的移动通信网、Loran-C 海事导航系统等已存在的通信网。

(5) 用户接收机及终端

用户接收机及终端的基本功能是用户实现 GALILEO 所提供的各种卫星无线导航服务, 它应具备下列功能: 直接接收 GALILEO 的 SIS 信号; 拥有区域和局域设施部分所提供服务的接口; 能与其他导航系统(如 GPS)及通信系统(如 UMTS)互操作。

另外, GALILEO 接收机还具有通过集成标准化微芯片来实现其他功能的技术潜力。

例如,将 GALILEO 微型终端集成进入移动电话,使之具备导航定位功能;集成航空导航功能,使之应用于飞行器试验;集成进入车载导航平台,向驾驶员提供定位与交通监测服务。

1.1.5.3 GALILEO 服务模式

GALILEO 在军事和民用等领域都具有十分广阔的应用前景,可提供免费服务和有偿服务两种服务模式。免费服务的设计定位精度为 6 m,比现有 GPS 民用信号精度高;有偿服务的定位精度可优于 1 m,将为民航等用户提供高可靠性和高精度的导航定位服务。虽然 GALILEO 提供的信息仍然是位置、速度和时间,但是其服务种类比 GPS 多。GPS 仅有标准定位服务(SPS)和精确定位服务(PPS)两种,而 GALILEO 则提供 5 种服务,分别是公开服务(OS)、生命安全(SoL)服务、商业服务(CS)、公共特许服务(PRS)、搜救(SAR)服务。表 1-5 给出了部分 GALILEO 导航服务性能参数。

表 1-5 GALILEO 导航服务性能参数

伽利略服务		公开服务	商业服务	生命安全服务	公共特许服务
覆盖		全球	全球	全球	全球
定位精度(水平,2dRMS,95%)(垂直,95%)		单频:15 m 或 24 m(水平)、35 m(垂直);双频:4 m(水平)、8 m(垂直)	双频:4 m(水平)、8 m(垂直)	单频:15 m 或 24 m(水平)、35 m(垂直);双频:65 m(水平)、12 m(垂直)	
定时精度		30 ns	30 ns	30 ns	30 ns
完好性	警告限制	无	无	12 m(水平)、20 m(垂直)	20 m(水平)、35 m(垂直)
	警告时间			6 s	10 s
	完好性风险			$3.5 \times 10^{-7}/150$ s	$3.5 \times 10^{-7}/150$ s
连续性风险				$1 \times 10^{-5}/15$ s	$1 \times 10^{-5}/15$ s
服务有效性		99.5%	99.5%	99.5%	99.5%
通道控制		免费开放通道	控制通道,测码距和导航数据	导航数据的完好性信息证明	控制通道:测码距和导航数据
确认和服务保证		无	服务的可用性保证	服务的安全性保证	服务的安全性保证

1.1.6 其他导航定位系统

(1) 日本“QZSS”简介

GPS 在全球应用越来越广泛,已成为全球范围内的重要信息源,相关产品和服务市场迅速扩大,发展成了一个重要产业。同时,卫星导航定位技术具有重要的军民两用价值,对于一个国家的国防和军事发展具有重要意义。面对具有如此巨大作用的技术和产业,有着先进航天技术的日本既不甘心落于人后,失去市场,也不愿意在国防能力上完全依附别人,因此开发独立的卫星导航定位系统就成为日本政府发展的一个重点,发展具有区域导航定位功能的准天顶卫星系统(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)成为必然。

QZSS 由 3 颗卫星组成,分别运行在倾角 45°、升交点赤经 140°、与地球自转周期相同的 3 条轨道上。相对地球而言,每颗卫星每天都沿着相同的轨迹运行。通过调整平均近点角,

可以使 3 颗卫星以大约 8 h 的间隔在同一轨道上等间隔运行。卫星轨道的长半径与地球静止轨道半径相差不多,约为 42 164 km。卫星每个恒星日(约 23 小时 56 分钟)绕地球一圈。但与地球静止轨道卫星不同的是,这 3 颗卫星各自有不同的轨道,并且这 3 条轨道都与地球赤道所在平面呈 45° 的夹角。因此,从日本本土来看始终有 1 颗卫星停留在靠近天空顶点的地方,所以日本称之为“准天顶卫星系统”(参见图 1-5)。卫星在地面上的投影都呈同一个大 8 字形,如图 1-6 所示。

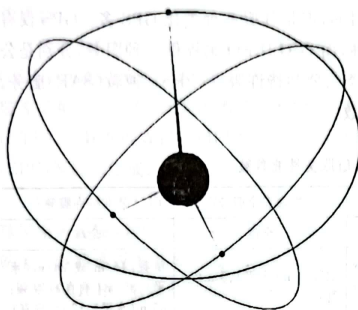


图 1-5 准天顶卫星的轨道

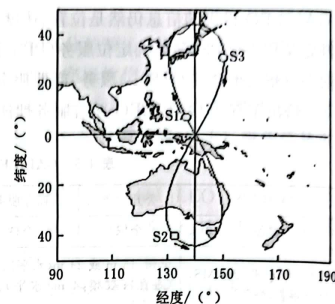


图 1-6 准天顶卫星在地面上的投影轨迹

QZSS 有利于增进 GPS 信号的可用性和增加 GPS 导航的准确度和可靠度。在日本,现在广泛使用于通信的地球同步轨道卫星相对地面的仰角不超过 48° ,其发出的信号由于受地面高层建筑物的遮挡,实际只能覆盖城市面积的 30%;而准天顶卫星的仰角在 60° 以上,覆盖率可达 100%。准天顶卫星的定位功能可分为 GPS 的补充和加强两种情况。所谓补充就像是单纯地增加 GPS 卫星数量,提供与 GPS 一样的无偿服务;而加强部分则为通过修正 GPS 信息提高精度,提供精度高于普通 GPS 有偿定位服务的功能,如提供卫星钟精密时间改正、电离层的准确数据等重要信息。

QZSS 是日本版的区域卫星定位系统。日本于 2010 年 9 月发射 QZS-1 号星,2017 年 6 月 1 日、8 月 19 日和 10 月 10 日分别成功发射第 2~4 颗 QZSS 卫星,从而形成四星运行的应用体制,可将 GPS 的 10 m 误差降低至厘米级。该系统投入使用后,被应用于农业、工程机械的自动驾驶和无人机运输物资等方面。该系统计划至 2023 年由 7 颗卫星构成,以便增强连续性和进行更好的可持续定位。

(2) 印度 IRNSS 简介

印度政府于 2006 年 5 月 9 日正式批准实施“印度区域卫星导航系统”(Indian Regional Navigation Satellite System, IRNSS)重大工程,该工程预计耗资 160 亿卢比(约合 3.5 亿美元)。“印度将在未来 6 年间陆续发射 7 颗导航定位卫星,在外层空间打造印度版的 GPS。”2007 年 9 月 27 日印度空间研究组织主席玛达万·奈尔在国际空间大会上作出的这一宣示,预示着国际导航与定位服务市场将出现第五位雄心勃勃的服务提供商。

IRNSS 星座由 7 颗卫星组成(参见图 1-7),其中 3 颗 GEO(Geostationary Orbit)卫星、4 颗 IGSO(Inclined Geosynchronous Orbit)卫星。3 颗 GEO 卫星分别定点于东经 34° 、 83°

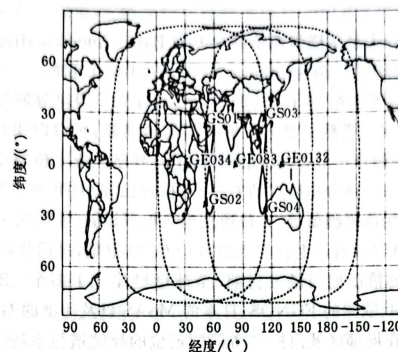


图 1-7 IGSO 卫星星下点轨迹及 GEO 卫星覆盖区域

和 132° , 4 颗 IGSO 卫星部署在倾角为 29° 的地球同步轨道上, 星下点轨迹呈两个“8”字形, 交点地理经度分别为东经 55° 和 111° 。星座中 IGSO 卫星星下点轨迹及 GEO 卫星的覆盖范围如图 1-7 所示, 星座中卫星布局相对印度区域来说呈对称结构(有利于对区域的覆盖)。处于 S 波段的导航信号由星上的相控阵天线发射, 以确保实现设计中规定的覆盖区域和信号强度。每颗卫星质量大约为 $1\,330\text{ kg}$, 其太阳能电池帆板能产生 $1\,400\text{ W}$ 的电能。该系统能够为印度全境及其周边 $2\,000\text{ km}$ 范围的区域提供导航定位服务, 定位精度在 20 m 以下。除了提供导航定位服务外, IRNSS 还将提供对地监测、远程通信、信息传输、灾情评估和公共安全等服务。

2014 年 7 月该系统首颗卫星 IRNSS-1A 发射成功, 2016 年 4 月 28 日在萨迪什·达万航天中心发射 IRNSS-1G 导航卫星, 这是印度自主研制的 IRNSS 区域导航定位系统的第 7 颗也是最后一颗组网卫星, 印度成为继美国、俄罗斯、中国、欧盟之后, 世界上第五个拥有自主导航卫星定位系统的国家。

1.1.7 GNSS 简介

GNSS 泛指所有的卫星导航系统, 包括全球的、区域的和增强的, 如美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、中国的 BDS、欧洲的 GALILEO、美国的广域增强系统(Wide Area Augmentation System, WAAS)、俄罗斯的差分校正和监测系统(System of Differential Correction and Monitoring, SDCM)、欧洲的地球静止导航重叠服务(European Geostationary Navigation Overlay Service, EGNOS)、日本的准天顶卫星系统 QZSS 和多功能卫星星基增强系统(Multi-functional Satellite Augmentation System, MSAS)、印度的区域卫星导航系统 IRNSS 和 GPS 辅助静地轨道增强导航系统(GPS Aided Geo Augmented Navigation, GAGAN)、加拿大的广域增强系统(Canada Wide Area Augmentation System, CWAAS)以及尼日利亚的 NIG-GOMSAT-1 等, 还涵盖在建和以后要建设的其他卫星导航系统。国际 GNSS 是个多系统、多层面、多模式的复杂组合系统, 其定位精度、定位速度和可靠性都将大

幅提高。

GNSS 增强型系统分为星基增强系统(Satellite Based Augmentation System, SBAS)和地基增强系统(Ground Based Augmentation System, GBAS)两种。

SBAS 主要由地面参考基站、主控站、上传站和地球同步卫星等四部分组成。SBAS 通过地球静止轨道(GEO)卫星搭载卫星导航增强信号转发器,可以向用户播发星历误差、卫星钟差、电离层延迟等多种修正信息,实现对原有卫星导航系统定位精度的改进。SBAS 的工作原理大致为:首先,由大量分布极广的差分站(位置已知)对导航卫星进行监测,获得原始定位数据(伪距、载波相位观测值等)并传送至中央处理设施(主控站),后者通过计算得到各卫星的各种定位修正信息,通过上行注入站发给 GEO 卫星,最后将修正信息播发给广大用户,从而达到提高定位精度的目的。目前,全球已经建立了多个 SBAS,如上述美国的 WAAS、俄罗斯的 SDCM、欧洲的 EGNOS、日本的 MSAS 以及印度的 GAGAN 等。

GBAS 是一种能够在局部区域内提供高精度定位的导航增强系统,又称局域增强系统(Local Area Augmentation System, LAAS)。其原理与 WAAS 类似,只是用地面的基准站代替了 WAAS 中的 GEO 卫星,通过这些基准站向用户发送测距信号和差分改正信息,从而实现精密导航和定位。目前,全球已经建立了众多的 GBAS,如美国的国家差分 GPS(NDGPS)、美国连续运行参考站(CORS)、英国的 OSNet、德国的 SAPOS、加拿大的 CACS、澳大利亚的 CORSnet-NSW、日本的 COSMOS 以及中国的北斗地基增强系统和国家连续运行基准站 CORS 网等。

1.2 卫星导航定位系统组成

卫星导航定位系统由卫星星座(空间部分)、地面监控系统(地面控制部分)和信号接收机(用户设备部分)等三部分组成。本节主要以 GPS 为例,介绍其构成。

1.2.1 卫星星座

GPS 的空间部分的标准配置由 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星组成,记作(21+3)GPS 星座,如图 1-1 所示。24 颗卫星均匀分布在 6 个轨道平面内,轨道倾角为 55° ,各个轨道平面之间相距 60° ,即轨道的升交点赤经各相差 60° 。每个轨道平面内各颗卫星之间的升交角距相差 90° ,任一轨道平面上的卫星比西边相邻轨道平面上的相应卫星超前 30° 。卫星轨道近于圆形:长半轴长度为 26 560 km,最大偏心率为 0.01。卫星轨道高度约为 20 200 km,运行周期约为 12 恒星时(11 小时 58 分钟)。对于地面观测者来说,每天将提前 4 min 见到同一颗 GPS 卫星。

GPS 卫星这一分布方式,保证了地面上任何时间、任何地点至少可同时观测到 4 颗卫星;同一观测站上每天出现的卫星分布图形相同,只是每天提前约 4 min;每颗卫星每天约有 5 h 在地平线以上,同时位于地平线以上的卫星数视时间和地点而定,最少为 4 颗,最多可达 12 颗。在利用 GPS 信号进行导航定位时,为了解算测站的三维坐标,至少需要观测 4 颗 GPS 卫星,称为定位星座。

GPS 卫星质量达 1 500 kg,设计寿命为 7.5 a,其主要部件包括高精度的时钟、导航电文存储器、双频发射和接收机以及微处理机。每颗卫星装有 4 台高精度原子钟(2 台铷钟和 2

台铯钟),这是卫星的核心设备,它将发射标准频率信号,为GPS测量提供高精度的时间标准。每颗卫星都以两个L波段频率发射载波无线电信号($L_1=1\,575.42\text{ MHz}$,波长约为19 cm; $L_2=1\,227.60\text{ MHz}$,波长约为24 cm)。在L载波上测距用P码(精码,码长约为30 m)和C/A码(粗码,码长约为300 m),P码专供美国军方和特许用户使用,C/A码提供民用的标准定位服务。此外,在载波上还调制了50 bit/s的数据码和导航电文,内容包括卫星星历、电离层模型系数、状态信息、时间信息和卫星钟偏差以及漂移信息等。

在GPS中,GPS卫星的作用如下:

- ① 向广大用户连续不断地发射卫星导航定位信号(简称GPS信号),并用导航电文报告自己的现势位置以及其他在轨卫星的概略位置。
- ② 在飞越注入站上空时,接收由地面注入站发送到卫星的导航电文和其他有关信息,并通过GPS信号形成电路,适时地发送给广大用户。
- ③ 接收地面主控站通过注入站发送到卫星的调度命令,如适时地改正运行的偏差或者启用备用时钟等。
- ④ 星载高精度原子钟提供精确的时间标准,使各卫星处于同一时间标准——GPS时。

目前(2020年7月31日)GPS在轨卫星共有33颗,其中工作卫星31颗,1颗卫星处于维护状态,1颗卫星处于退役状态。33颗卫星中,ⅡR-M型卫星有8颗、Ⅱ-F型卫星有12颗、Ⅱ-R型卫星有11颗,Ⅱ-A型卫星有1颗,Ⅲ-A型卫星有1颗(见表1-1)。

1.2.2 地面监控系统

对于卫星导航定位系统来说,卫星是空中高速运动的动态已知点,其位置是依据卫星发射的星历——描述卫星运动及其轨道的参数计算得到的,而每颗卫星所播发的星历是由地面监控系统提供的。卫星上的各种设备是否正常工作以及卫星是否一直沿着预定轨道运行,都要由地面设备进行监测和控制。地面监控系统的另一重要作用是保持各颗卫星处于同一时间标准——GPS时。

GPS的地面监控系统包括1个主控站、3个注入站和5个监测站(图1-8)。主控站设在美国本土科罗拉多·斯平士(Colorado Springs)的联合空间执行中心;3个注入站分别设在印度洋的狄哥·伽西亚(Diego Garcia)、南大西洋的阿松森岛(Ascension)和南太平洋的卡瓦加兰(Kwajalein);5个监测站包括1个主控站和3个注入站,另外还在夏威夷设立了一个监测站。



图1-8 GPS地面控制系统

主控站除协调和管理所有地面监控系统的工作外,其主要任务是:

- ① 根据本站和其他监测站的所有观测资料推算编制各卫星的星历、卫星钟差和大气层的修正参数等,并把这些数据传送到注入站。
- ② 提供全球定位系统的时间基准。各监测站和 GPS 卫星的原子钟均应与主控站的原子钟同步或测出时钟差,并把这些钟差信息编入导航电文送到注入站。
- ③ 调整偏离轨道的卫星,使之沿预定的轨道运行。
- ④ 启用备用卫星以代替失效的工作卫星。

监测站是在主控站直接控制下的数据自动采集中心,站内设有双频 GPS 接收机、高精度原子钟、计算机各一台和若干台环境数据传感器。接收机对 GPS 卫星进行连续观测,以采集数据和监测卫星的工作状况;原子钟提供时间标准;环境传感器收集当地的气象数据。所有观测资料由计算机进行初步处理(如计算对流层、电离层、天线相位中心、相对论效应改正数等),每 15 min 平滑一次观测数据,依此推算出每 2 min 间隔的观测值,并存储和传送到主控站,用以确定卫星的轨道。

注入站的主要设备包括一台直径为 3.6 m 的天线,一台 C 波段发射机和一台计算机。其主要任务是在主控站的控制下,将主控站推算和编制的卫星星历、钟差、导航电文和其他控制指令等注入相应卫星的存储系统,并监测注入信息的正确性。注入站每天注入 3 次,每次注入 14 d 的星历。此外,注入站能自动向主控站发射信号,每分钟报告一次自己的工作状态。

整个 GPS 的地面监控部分,除主控站外均无人值守。各站间用现代化的通信系统联系起来,在原子钟、计算机的驱动和精确控制下,各项工作能实现高度的自动化和标准化。

GPS 现代化计划之一是地面控制系统的升级改造。为了提高控制精度,适应 GPS 现代化的需要,GPS 地面控制站已经增加到 12 个,并最终将达到 19 个(图 1-9),分布在世界各地,以保证在全球范围内对每颗在轨卫星至少有两个站对其实施连续的实时跟踪观测。

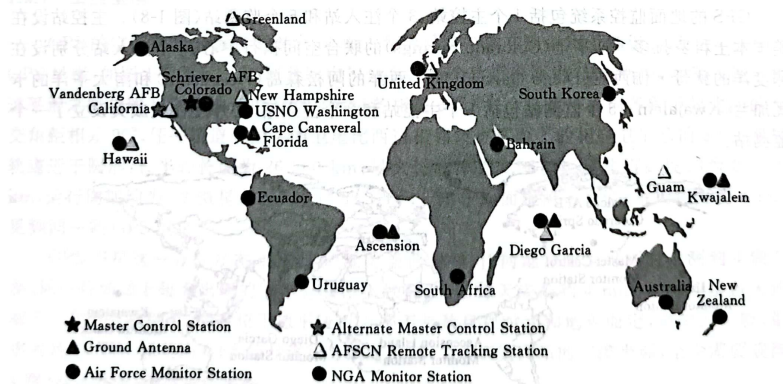


图 1-9 GPS 地面控制系统的升级改造

1.2.3 信号接收机

全球定位系统的空间部分和地面监控部分,是用户广泛应用该系统进行导航和定位的基础,而用户只有通过信号接收机(用户设备)才能实现利用 GNSS 导航和定位的目的。

(1) 信号接收机的作用

GPS 信号接收机是一种能够接收、跟踪、变换和测量 GPS 卫星信号的接收设备,简称 GPS 接收机,其作用有:

① 当 GPS 卫星在用户视界升起时,接收机能够捕获到按一定卫星截止高度角所选择的待测卫星,并能够跟踪这些卫星的运动。

② 对所接收到的 GPS 信号具有变换、放大和处理的功能,以便测量出 GPS 信号从卫星到接收机天线的传播时间,解译出 GPS 卫星所发射的导航电文,实时地计算出测站的三维位置甚至三维速度和时间,从而实现导航和定位。

能同时接收 GPS、GLONASS、BDS、GALILEO 等卫星信号的接收机,称为 GNSS 卫星定位接收机(简称 GNSS 接收机)。GNSS 接收机具有以下优越性:

① 接收卫星数增加。使用 GPS 接收机时,接收到的卫星数一般为 5~11 颗;而使用 GNSS 接收机时,目前一般可接收到的卫星数可达 20~30 颗。这样,非常有利于在山区或城市有障碍物遮挡的地区作业。

② 效率提高。因 GNSS 接收机可观测到的卫星数增加,所以求解整周模糊度的时间缩短,从而可减少野外观测时间,提高生产效率。

③ 定位的可靠性和精度提高。因观测到的卫星数增加,用于定位计算的卫星数增加,卫星几何分布(DOP 值)也更好,所以可提高定位的可靠性和精度。

(2) 接收机的结构

用户设备主要包括 GNSS 接收机及其天线、微处理器及其终端设备以及电源等(图 1-10)。其中接收机和天线是用户设备的核心部分,一般习惯统称为 GNSS 接收机。

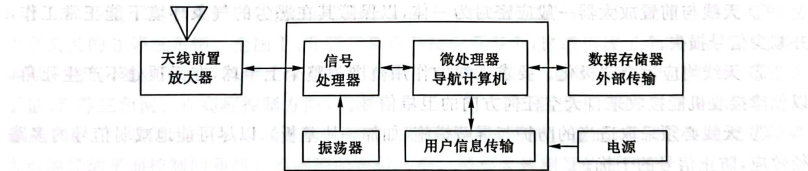


图 1-10 GNSS 接收机的结构示意图

如果把 GNSS 接收机作为一个用户测量系统,那么按其构成部分的性质和功能可分为硬件部分和软件部分。硬件部分主要指上述接收机、天线和电源等硬件设备,而软件部分是支持接收机硬件实现其功能并完成各种导航与定位任务的重要条件。一般来说,软件包括内软件和外软件。所谓内软件是指诸如控制接收机信号通道,按时序对各卫星信号进行量测的软件以及内存或固化在中央处理器中的自动操作程序等,这类软件已与接收机融为一体。外软件主要是指观测数据的后处理软件系统,这种软件一般以磁盘方式提供。如无特别说明,通常所说的接收设备的软件均指这种后处理软件系统。软件部分是构成现代

GNSS 测量系统的重要组成部分之一。一个功能齐全、品质良好的软件不仅能方便用户使用,满足用户的多方面要求,而且对于改善定位精度、提高作业效率和开拓新的应用领域都具有重要意义。所以,软件的质量与功能已成为反映现代 GNSS 测量系统先进水平的一个重要标志。

(3) 接收机的分类

GNSS 导航与定位技术的迅速发展和应用领域的不断开拓,使得世界各国对 GNSS 接收机的研制与生产都极为重视,目前世界上 GNSS 接收机的生产厂家有数十家,而型号超过数百种。根据不同的观点,GNSS 接收机可有多种不同的分类。

① 按接收机可接收到的载波频率,可分为单频接收机(Single Frequency Receiver)、双频接收机(Double Frequency Receiver)和多频接收机。

② 按接收机的用途,可分为导航(Navigation)型接收机、测地(Survey)型接收机和授时(Time)型接收机。测地型接收机主要用于精密大地测量和精密工程测量,这类仪器主要采用载波相位观测值进行相对定位,定位精度高。

③ 按接收机的通道数,可分为多通道(Multi-Channel)接收机、序贯通道(Sequential-Channel)接收机和多路复用通道(Multiplex Channel)接收机。

④ 按接收机的工作原理,可分为码相关型接收机(Code-Correlating Receiver)、平方型接收机(也称为无码接收机,Codeless Receiver)和混合型接收机(Hybrid Receiver)。目前,在测量工作中广泛使用的接收机多为混合型接收机。

(4) 接收机天线

接收机天线是将来自卫星信号的极微弱的电磁波能量转化为相应的电流,经过前置放大器进行电流放大并送入射频部分进行频率变换,以便接收机对信号进行跟踪、处理和量测的装置。

天线是接收设备的重要部件之一,它的品质对于减少信号损失、防止信号干扰、提高导航与定位的质量和精度具有重要意义。因此,对接收机天线提出了以下要求:

① 天线与前置放大器一般应密封为一体,以保障其在恶劣的气象环境下能正常工作,并减少信号损失。

② 天线均应呈全圆极化。要求天线的作用范围为整个上半球,在天顶处不产生死角,以保障接收机能接收来自天空任何方向的卫星信号。

③ 天线必须采取适当的防护与屏蔽措施(如加一块基板),以尽可能地减弱信号的多路径效应,防止信号的干扰。

④ 天线的相位中心与几何中心之间的偏差应尽量小,且保持稳定。由于 GNSS 测量的观测量是以天线的相位中心为准的,而在作业中天线的安置是以其几何中心为准的,所以在天线的设计中,应尽可能保持两个中心的一致性和相位中心的稳定性。

1.3 GNSS 技术特点及应用

1.3.1 GNSS 的特点

与经典大地测量相比,GNSS 技术具有以下优点:

① 选点灵活,无须通视。GNSS 测量不要求观测站之间通视,因而不需要建造觇标。这一优点既可减少测量工作的经费和时间,同时也使点位的选择变得甚为灵活,但要求净空。

② 定位精度高。现已完成的大量试验表明,在小于 50 km 的基线上其相对定位精度可达 $(1\sim 2)\times 10^{-6}$,而在 100~500 km 的基线上其相对定位精度可达 $10^{-6}\sim 10^{-7}$ 。随着观测技术与数据处理方法的改善,可望在大于 1 000 km 的距离上,相对定位精度达到或优于 10^{-8} 。

③ 观测时间短。目前,利用经典的静态定位方法,完成一条基线的相对定位所需要的观测时间,根据要求的精度不同,一般为 1~3 h。为了进一步缩短观测时间,提高作业速度,近年来发展的短基线(例如不超过 20 km)快速相对定位法,其观测时间仅需数分钟。

④ 提供三维坐标。GNSS 在精确测定观测站平面位置的同时,可以精确测定观测站的大地高。GNSS 测量的这一特点,不仅为研究大地水准面的形状和确定地面点的高程开辟了新途径,同时也为其在航空物探、航空摄影测量及精密导航中的应用提供了重要的高程数据。

⑤ 操作简便。GNSS 测量的自动化程度很高,在观测中测量员的主要任务只是安装并开关仪器、量取仪器高、监视仪器的工作状态和采集环境的气象数据,而其他观测工作,如卫星的捕获、跟踪观测和记录等均由仪器自动完成。另外,GNSS 接收机一般质量较轻、体积较小,因此携带和搬运都很方便。

⑥ 全天候作业。GNSS 观测工作,可以在任何地点、任何时间连续地进行,一般不受天气状况的影响。

1.3.2 GNSS 技术对经典大地测量的影响

自中华人民共和国成立以来,我国测绘工作者在全国范围内沿着经纬线方向布设了 I 等三角锁,每隔 200 km 在锁的交叉处布设有起始边长和起始方位角。I 等锁总长度近 8 万 km,构成 120 多个锁环,近 400 个锁段。在 I 等锁的控制下,全面布设了 II 等三角网或十字交叉的 II 等三角锁。全国 I、II 等三角点共计 5 万多个,这就构成了全国平面控制的基本网。随后,随着国民经济建设以及测制基本图的需要,在 I、II 等三角锁网的控制下,建立了 III、IV 等三角网。在高程控制方面,全国建立了 I 等水准网,总长度约 9 万 km。接着又建立了 II、III、IV 等水准网,以满足各个部门和各项工作的需要。至此,我国已经完成了经典大地测量的平面控制网和高程控制网的布设工作。经典大地测量的现状是:

(1) 标志破坏严重

平面控制网的三角点标志(木标、钢标和标石)破坏相当严重,尽管颁布了保护测量标志的通告,但其仍然遭受人为和自然的严重破坏,已经到了不可应用的地步。

(2) 控制网的精度不够高

采用经典大地测量方法建立的平面控制网,是以丈量基线和观测角度向前推进的,误差积累尤甚。从测量基线 1/100 万的相对误差起始,一直推算到 IV 等三角网上,相对误差达到 1/50 000,已不适应现代精密工程的需要,更无法满足地学研究的需求。

(3) 平面与高程控制分离

所建立的平面控制网和高程控制网是各自独立的,没有形成统一的坐标系,使用非常

不方便。

(4) 平面点位难于到达

三角点大都选在制高点上,并且为保证一定的图形结构,点位多半设在山峰上,交通不便,难于到达。

在经济高速发展的今天,经典大地测量网面临着全面改造的问题。GNSS 的出现,为经典大地测量网的改造提供了强有力的技术手段。

GNSS 测量与经典大地测量各有特点,两者相比较,存在着下列差异:

(1) 结构方面

经典大地测量控制网分为平面控制网和高程控制网,其相互独立、各成系统。平面控制网是利用测距仪测边和经纬仪测角构成一定的三角形或四边形来完成的。为了保证点间的通视,三角点必须设在制高点上;为了保证坐标传递的精度,三角点间构成的网形要求具有较规则的几何图形。高程控制网是利用水准仪逐站测量两点间的高差来建立的,因而要求水准点要选在地势平坦和交通方便的道路两边。可见,二者对点位的要求和观测方法是截然不同的,因此也就无法统一起来,在计划、施测、数据处理和应用上自成体系。

而采用 GNSS 技术时,已知点在卫星上,待求点的位置(平面位置和高度)是根据接收卫星的信号而得出的,它只与卫星相联系而与其他点无关,因而相邻点间不要求通视,即可获得地面点在全球地心坐标系中的坐标。这样,一方面省去了大量的地面测设工作,把测绘人员从繁重的地面劳动中解放出来,极大地提高了测量的效益;另一方面,将平面坐标系和高程坐标系统一到全球坐标系中,使二者成为一个整体。

(2) 层次方面

经典大地测量是指广阔区域的测量方法。区域广,如果采取一次布网的密集测量方式,以短边传递,则由于存在观测误差,边长和方位角的误差必然迅速增加,精度迅速降低。因此,经典大地测量按照用途、使用仪器、观测精度和边长的不同,将控制网由高级到低级分为 I、II、III、IV 等四个层次,高一级作为下一级的控制基准,下一级作为高一级的补充,遵循“由大到小、逐级控制”的原则,从而使得大地控制网的建立成为旷日持久的工作。

GNSS 技术则截然不同。GNSS 定位网不存在误差积累这一问题,抛弃了“由大到小、逐级控制”这一布网原则。它在观测中所使用的仪器相同,观测精度也相同,若要提高定位精度,则只要稍微延长观测时间,所费极微。而经典大地测量中,高等点与低等点的代价之比是很大的。

(3) 数据处理方面

经典大地测量的观测数据是在重力空间获得的,而地面点的平面位置必须用大地坐标表示,它们是在一个以椭球面为参考的几何空间中的量。为了把重力空间的观测数据进行分级处理,在结构上必须将平面控制和高程控制分别处理,在层次上必须将 I、II、III、IV 等网分别处理。由于它们的观测量不等权,无法进行整体平差;相反,联合平差会使成果变坏。

采用 GNSS 技术则截然不同,它可以直截了当地得出地面点在地心坐标系中的三维坐标,从而避免复杂的归算问题。由于 GNSS 观测量是等权的,因而可将高等级点和低等级点统一处理。

GNSS 的出现,对测绘界产生了深刻的影响,它使得一些经典的测量方法成为历史。虽然 GNSS 可能还不会完全取代经典测量方法,但其主导作用是毋庸置疑的。

1.3.3 GNSS 的应用

20 世纪 70 年代后期,我国有关单位在从事理论研究的同时,引进并试制成功了各种人造卫星观测仪器。根据多年的观测实践,完成了全国天文大地网的整体平差,建立了 1980 年国家大地坐标系,进行了南海群岛的联测。

80 年代初,我国一些院校和科研单位已开始研究 GPS 技术,在 GPS 定位基础理论研究和应用开发方面做了大量工作。80 年代中期,我国引进 GPS 接收机,并应用于各个领域,同时着手研究建立我国自己的卫星导航系统。

在大地测量方面,我国利用 GPS 技术开展国际联测,建立全球性大地控制网,提供高精度的地心坐标,测定和精化大地水准面。国家 A 级和 B 级 GPS 大地控制网分别于 1996 年和 1997 年建成并先后交付使用。A 级网由 30 个点组成,平均边长为 650 km,水平方向重复相对精度优于 2×10^{-8} ,垂直方向不低于 7×10^{-8} ,绝对精度(相对地心)不低于 ± 0.1 m。B 级网由 800 个点组成,平均边长为 150 km,水平方向重复相对精度优于 4×10^{-8} ,垂直方向不低于 8×10^{-8} ,绝对精度(相对地心)不低于 ± 1 m。国家 A 级和 B 级 GPS 大地控制网的建成,标志着我国具有分米级绝对精度的三维大地坐标系统已基本建成,为我国空间技术和空间基础数据、实时动态定位技术等提供了精确可靠的参照系。

在工程测量方面,工程技术人员应用 GNSS 静态相对定位技术,布设精密工程控制网,用于城市和矿区地面沉降监测、大坝变形监测、高层建筑变形监测、隧道贯通测量等精密工程;应用 CORS RTK 测绘各种比例尺地形图和进行工程建设中的施工放样。

在航空摄影测量方面,测量工作者应用 GNSS 技术进行航测外业控制测量、航摄飞行导航、机载 GNSS 航测等各个阶段。

在地球动力学方面,GPS 技术用于全球板块运动监测和区域板块运动监测。我国已开始用 GPS 技术监测南极洲板块运动、青藏高原地壳运动、四川鲜水河地壳断裂运动,建立了中国地壳形变观测网、三峡库区形变观测网、首都圈 GPS 形变监测网等。

此外,我国在军事国防、智能交通、邮电通信、航空航天、测时授时、物理探矿、姿态测定等领域,在地矿、煤矿、石油、建筑以及农业、气象、土地管理、环境监测、金融、公安等部门和行业,也都开展了 GNSS 技术的研究和应用。

近几年,我国已建成了北京、武汉、上海、西安、拉萨、乌鲁木齐等永久性的 GPS 跟踪站,对 GPS 卫星进行精密定轨,为高精度的 GPS 定位测量提供观测数据和精密星历服务,致力于我国连续运行参考站网(Continuously Operating Reference System,CORS)系统建设,参与全球卫星导航系统(GNSS)和 GPS 增强系统(WAAS)的筹建。

为了适应 GNSS 技术的发展与应用,1995 年我国成立了中国全球定位系统技术应用协会,2012 年 9 月正式更名为中国卫星导航定位协会(简称“中位协”),英文名称为 GNSS and LBS Association of China,英文缩写为“GLAC”。中位协是我国卫星导航与位置服务领域的全国性行业协会,协会现有会员单位近 2 000 个,理事和常务理事单位 450 个,会员单位包括从事全球卫星导航系统和位置服务技术应用的科研、生产、经营企事业单位、社会团体、科研院所、高等院校等。协会设有空间定位专业委员会、导航应用专业委员会、教育与发展

专业委员会、大数据专业委员会、室内导航定位专业委员会、一带一路国际专业委员会、雄安北斗应用信息交流工作委员会、北斗资源环境应用专业委员会等 28 个专业委员会。

为促进我国卫星导航产业快速健康发展,推动北斗卫星导航系统规模化应用,国务院办公厅于 2013 年 9 月 26 日发布《国家卫星导航产业中长期发展规划》(以下简称《规划》)。《规划》提出了我国卫星导航产业发展目标:到 2020 年,我国卫星导航产业创新发展格局基本形成,产业应用规模和国际化水平大幅提升,产业规模超过 4 000 亿元,北斗卫星导航系统及其兼容产品在国民经济重要行业和关键领域得到广泛应用,在大众消费市场逐步推广普及,对国内卫星导航应用市场的贡献率达到 60%,重要应用领域达到 80%以上,在全球市场具有较强的国际竞争力。

北斗卫星导航系统在“一带一路”沿线近 40 个国家得到了广泛的应用。据最新数据统计,北斗高精度基础产品已输出到全球范围的 90 多个国家和地区,包括近 40 个“一带一路”沿线国家,“一带一路”沿线国家的农业、工业、服务行业等都逐渐使用北斗高精度产品。例如,在东南亚,印度尼西亚国土资源部基于北斗卫星导航系统,开展土地确权项目,包括印度尼西亚国土、公路、铁路、水利工程的勘测和施工,该应用使用基于北斗的高精度 GNSS 接收机一千余台;缅甸将北斗卫星导航系统应用于农业数据采集统计、土地管理;柬埔寨北斗无人机应用作业范围广、成图效率高,为柬埔寨政府部门综合规划、国土整治监控、基础设施建设、生态环境监控等提供了完整的基础信息资料,为柬埔寨政府部门进行科学决策提供了依据。在南亚,巴基斯坦广泛使用北斗产品为港口管理、交通运输等领域提供服务;2014 年,中国北斗卫星导航系统首个海外组网项目——巴基斯坦国家位置服务网(CORS)一期工程完成建设,这是中巴两国在卫星导航领域深入合作的一个典范。在中东,科威特国家银行总部 300 m 高摩天大楼建设工程,利用北斗卫星导航系统实现地面控制点监测,增加了遮挡环境下的可视卫星数据,保证了施工过程中垂直方向毫米级测量误差要求,这也是北斗卫星导航技术在海外首次应用于高层建筑监测。在非洲,乌干达国土测绘部门已经利用高精度接收机建成 15 座基准站,覆盖了其国内主要的城镇、经济文化中心,其所提供的高精度位置服务不仅可以满足乌干达国土测绘需求,还拓展到水利、交通、农业、林业等多个领域。作为“一带一路”不可或缺的角色,北斗卫星导航系统将空间信息与大数据、云计算、物联网等高新技术完美融合,不断服务于“一带一路”,被称为“太空丝绸之路”。

我国的车载导航产业起步于 2002 年,目前有许多单位生产车载 GNSS。最近几年,随着中国汽车产业的高速发展,私家车的不断普及,车载导航行业也随之快速成长。2012 年、2013 年、2014 年和 2015 年,我国前装车载导航市场出货量分别为 130.9 万台、182.3 万台、251.1 万台和 371.2 万台,初装率分别为 8.45%、10.17%、12.75%和 17.6%。截至 2019 年 12 月,在北斗/GNSS 基础产品方面,国产北斗导航型芯片模块出货量已超 1 亿片,季度出货量突破 1 000 万片。北斗导航型芯片、模块、高精度板卡和天线已输出到 100 余个国家和地区。在交通运输方面,国内超过 650 万辆营运车辆、4 万辆邮政和快递车辆、36 个中心城市约 8 万辆公交车、3 200 余座内河导航设施、2 900 余座海上导航设施已应用北斗卫星导航系统,建成全球最大的营运车辆动态监管系统。在公共安全方面,构建了国家、省、市(县)三级北斗公安应用体系框架,全国 40 余万部北斗警用终端联入警用位置服务平台;通过北斗警用授时,统一了公安信息网时间基准。在救灾减灾方面,已建成部、省、市(县)三级平台,实现六级业务应用,推广北斗终端超过 4.5 万台。利用北斗/GNSS 高精度技术实现地

质灾害监测,成功提前预警甘肃黄土滑坡,时间精确到秒,移动范围精确到毫米。在智能手机领域,在中国市场申请入网的手机有400余款具有定位功能,其中支持北斗定位系统的近300款。在知识产权和标准化建设方面,国内卫星导航专利申请量快速增长,申请累计7万件,位居全球第一。

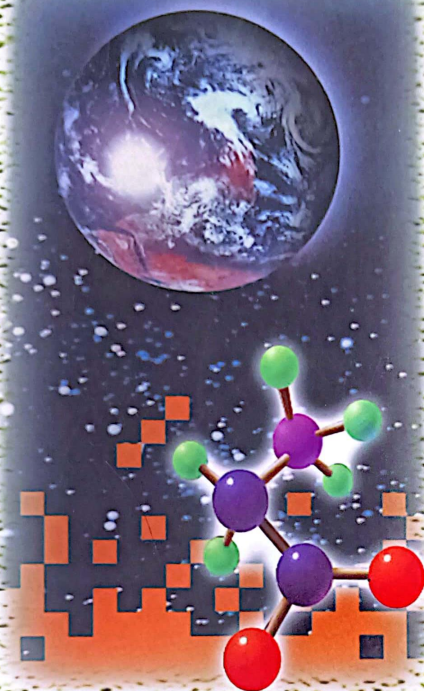
思考题

1. 当前的卫星导航系统有哪些?我国的北斗卫星导航系统的发展和规划如何?
2. 何为GNSS?
3. 与经典大地测量相比,GNSS技术具有哪些特点?对经典大地测量有何影响?
4. 在GPS中,GPS卫星、地面监控系统、信号接收机有哪些作用?
5. 高精度导航与定位对接收机天线有哪些要求?
6. GPS现代化包括哪些内容?
7. 中国卫星导航定位协会的重点工作有哪些?分支机构有哪些?

1. 北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 是中国自主研发、独立运行、自主可控的卫星导航系统。它由空间段、地面段和用户段组成。北斗系统的发展规划包括北斗三号全球卫星导航系统的建设,以及北斗系统在交通运输、农林渔业、水文监测、气象预报、灾害预警、公共安全、城市管理、大众消费等领域的应用。
2. GNSS (Global Navigation Satellite System) 是指全球卫星导航系统,包括GPS、GLONASS、Galileo、BDS等。
3. GNSS技术具有精度高、覆盖广、实时性强等特点。与经典大地测量相比,GNSS技术可以实现全天候、全天时、全球范围内的定位和导航。
4. 在GPS中,GPS卫星负责发送导航信号,地面监控系统负责接收卫星信号并进行数据处理,信号接收机负责接收卫星信号并进行定位计算。
5. 高精度导航与定位对接收机天线的要求包括:天线增益高、指向精度高、抗干扰能力强等。
6. GPS现代化包括:提高定位精度、增加系统可用性、增强系统完整性等。
7. 中国卫星导航定位协会的重点工作包括:推动卫星导航定位技术的研发和应用、开展卫星导航定位系统的建设和运营、开展卫星导航定位系统的维护和管理等。其分支机构包括:北斗卫星导航定位系统建设委员会、北斗卫星导航定位系统应用委员会等。



中国科学院研究生教学丛书



遥感应用分析原理与方法

(第二版)

赵英时 等 编著



科学出版社

第1章 遥感原理

遥感图像是电磁辐射与地表相互作用的一种记录。为了更好地理解与认识这些图像,我们首先必须了解电磁辐射原理以及它通过大气层再被地表反射辐射的过程,这是遥感的基础,也是这一章将讨论的内容。

§ 1.1 遥感电磁辐射原理

1.1.1 电磁辐射

1. 概念

假设在空间某处有一个电磁振源(电磁辐射源),那么在它的周围便有交变的电流或电场,它是由变速运动的带电粒子引起的。这一交变电场周围将激发起交变的磁场,而交变磁场周围又激起交变电场。这种变化的电场和磁场,相互激发交替产生,形成电磁场。

电磁场是物质存在的一种形式,具有质量、能量和动量。这种交变电磁场在空间的传播,形成电磁波。不同类型的电磁振源会产生不同波长、频率和能量的电磁波。电磁波是一种伴随变化的电场和磁场的横波,其传播方向与交变的电场、磁场三者互相垂直。电场振幅变化的方向垂直于它的传播方向,而磁场随电场传播方位在电场的右侧(图 1.1)。

电磁辐射是电磁波传递能量的过程,是能量的一种动态形式,只有当它与物质相互作用(包括发射、吸收、反射、透射)时才表现出来。电磁波的传输规律可以从麦克斯韦(Maxwell)方程式中推导出来。只需其中一个场(通常是电场)的方向和幅度,就可以从 Maxwell 方程确定另一个场的方向和幅度。麦克斯韦方程是在研究和总结宏观电磁现象中建立起来的,表达电磁辐射与物质的相互作用依赖于物质的电和磁的性质,所提出的方程不受这些辐射的频率、波长或振幅的限制。

Maxwell 用四个方程式描述电磁现象的基本规律,在方程式中引入几个物理量:电场强度矢量 E ,电位移矢量 D ,磁场强度矢量 H ,磁感应矢量 B ,电荷密度 ρ ,电流密度 J 。对线性各向同性介质,上述物理量之间有下列关系,即^[2]

$$\begin{aligned} D &= \epsilon E \\ B &= \mu H \\ J &= \sigma E \end{aligned} \quad (1.1)$$

式中: ϵ 为物质的介电常数, $\epsilon \geq 1$; μ 为物质的磁导率, $\mu \geq 1$; σ 为物质的电导率。在各向同性介质中, D 的方向与 E 一致, B 的方向与 H 一致, 电流密度 J 的方向与电场 E 的方向一致。

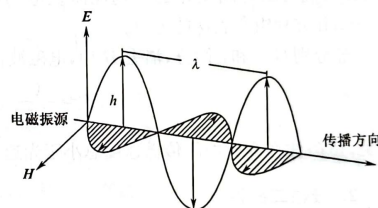


图 1.1 电磁波^[1]
 E : 电场; H : 磁场; λ : 波长; h : 振幅

Maxwell 方程的微分形式为

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{D} &= 4\pi\rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{1}{C} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{4\pi}{C} \mathbf{J} + \frac{1}{C} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\end{aligned}\quad (1.2)$$

式中: C 为光速, $C=2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

在真空中, 因为没有 ρ 、 \mathbf{J} , 且 $\epsilon=\mu=1$, 则 Maxwell 方程表示为

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{H} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{1}{C} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{1}{C} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\end{aligned}\quad (1.3)$$

Maxwell 方程将电场、磁场、电荷、电流联系起来。

若 x 轴方向传播的是平面电磁波, 电场矢量 \mathbf{E} 沿 y 轴方向, 可以证明磁场矢量 \mathbf{H} 在 y 轴方向的分量为零, 则磁场矢量必然是沿 z 轴方向, 三者相互垂直, 则得

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_y}{\partial x} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial H_z}{\partial t} \\ \frac{\partial H_z}{\partial x} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial E_y}{\partial t}\end{aligned}\quad (1.4)$$

式(1.4)说明随时间变化的磁场能激发电场, 反之随时间变化的电场能激发磁场。这便是 Maxwell 方程组所表达的思想。

经分别对 x 和 t 微分, 消去 \mathbf{H} 项, 电磁波在介质中传播速度则为

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad \epsilon \geq 1, \mu \geq 1 \quad (1.5)$$

可见, 电磁波在介质中的传播速度总小于光速 C , 但在真空中的传播速度等于 C 。

2. 波粒二象性

电磁辐射与物质相互作用中, 既反映波动性, 又反映出粒子性。光是电磁波的一个特例。光的波动性充分表现在光的干涉、衍射、偏振等现象中; 而光在光电效应、黑体辐射中, 则显示出粒子性。

1) 波动性

从电磁辐射的概念和上述方程, 已说明了电磁波的波动性, 即电磁波以波动的形式(光滑连续的波)在空间传播, 用波长、频率、振幅等来描述。电磁波是一种伴随电场和磁场的横波。许多电磁辐射特征可以很容易地用波动理论来加以描述, 而干涉和衍射均是由于波的叠加导致振幅和强度的重新分布。根据波的叠加原理, 又可从合成波中分离出不同的电磁波谱信息。

A. 干涉(interference)

一列波在空间传播时, 将引起空间各点的振动, 两列(或多列)波在同一空间传播时, 每列

波对各点的振动都有贡献,因此空间各点的振动就是各列波单独在该点产生的振动的矢量和。同振幅、频率和初位相(具固定位相关系)的两列(或多列)波的叠加合成而引起振动强度重新分布的现象称干涉现象。干涉现象中,在波의交叠区,有的地方振幅增大,有的地方振幅减小,振动强度在空间出现强弱相间的固定分布,形成干涉条纹。其合振动强度的变化完全取决于程差(两光程之差)。当所有程差为波长的整数倍($\Delta=h\lambda$),则对应振动强度极大;而所有程差为半波长奇数倍 $\left[\Delta=(2n+1)\frac{\lambda}{2}\right]$ 时,则对应振幅极小处。干涉现象普遍存在,它是波的一个重要特性,但只有相干波(具有固定位相关系的波束)才能产生干涉现象。

光波的干涉图样是一系列明暗相间的条纹或曲线。图 1.2 显示著名的光的干涉实验——杨氏双缝实验:用强光照射单缝 S,前方与 S 平行的开两个缝 S_1 、 S_2 ,它们成为两个新光源,光源间满足同频率、同方向、同振幅、有固定初位相等相干条件,两者为相干光。干涉结果在屏幕 P 上能看到一系列明暗相间的条纹,条纹的宽度与波长成正比。若光源为白光,则屏幕中央为白光亮纹,两侧为彩色干涉条纹,其中蓝光的间距最小,红光条纹的间距最大。光的干涉现象说明光是一种波。常见的油膜、肥皂泡的彩色也是一种分振幅的薄膜干涉现象。

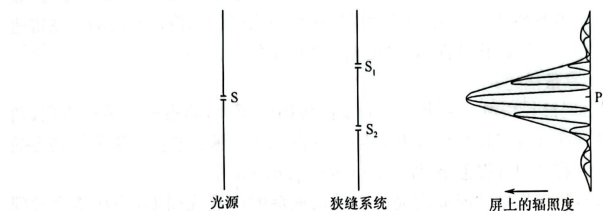


图 1.2 光的干涉^[2]

在光学器件与仪器中,大量应用光的干涉原理,如为了减少反射、增加透射,可以制作干涉滤光片、增透膜、透镜组等,也可以利用电磁波的干涉制作定向的发射天线。

B. 衍射(diffraction)

波在传播过程中遇到障碍物时,在障碍物的边缘一些波偏离直线传播而进入障碍物后面的“阴影区”的现象称为衍射现象。它是由于障碍物引起波的振幅或相位的变化,导致波在空间上振幅或强度的重新分布。衍射现象也是波的重要特性之一。例如,声波可传到拐角后面;光通过小孔,在孔后的屏上出现的不是一个亮点,而是一个亮斑。其亮斑周围有逐渐减弱的明暗相间的圆环。其亮斑的大小(衍射角 θ)与小孔的直径 d 成反比,与波长 λ 成正比,即 $\Delta\theta=1.22\lambda/d$ 。图 1.3 显示了小孔的衍射现象,一束平面波通过一个直径比波长还小的小孔后,成为球面波向前传播。

遥感中部分光谱仪的分光器件,正是运用多缝衍射原理,用一组相互平行、宽度相同、间隙相同的狭缝组成衍射光栅,使光发生色散以达到分光的目的。照相机的光阑、望远镜的物镜成像,以及光学仪器的分辨能力都与圆孔衍射有关。

C. 偏振(polarization)

偏振又称为极化,表示电磁波的电场振动方向的变化。偏振是横波中呈现出的一种特殊现象。电磁波作为一种横波,其相互垂直的电场和磁场的振动方向是与传播方向垂直的。传播方向确定后,

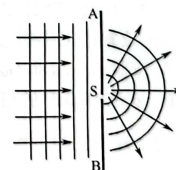


图 1.3 小孔的衍射^[2]

其振动方向并不是唯一的。它可以是垂直于传播方向(x 轴)的任何方向(即 y,z 平面内的任一方向)。它可以是不变的,也可以随时间按一定方式变化或按一定规律旋转。任一振动方向的电磁波总可以分解为水平与垂直两个特定的偏振方向。纵波则不同,其振动方向与传播方向一致,传播方向确定后其振动方向便是唯一的,所以不会有偏振现象。

通常把包含电场振动方向的平面称为偏振面,也就是用电场方向确定波的偏振方向。如果振动方向是唯一的,不随时间而改变,即偏振面方向固定,则为线性偏振(线性极化或平面极化)。在一个固定平面内仅沿一个固定方向振动的光为偏振光,线偏振光也称为全偏振光;太阳光是非偏振光,它在所有可能的方向上,其振幅可以认为是相等的,而不可能保持一个优势方向;介于自然光(非偏振光)与偏振光之间的称为部分偏振光。许多散射光、反射光、透射光均属部分偏振光,其部分能量有明确的极化状态,而一些人造光源(如激光和无线电、雷达发射)通常有明确的极化状态。

电磁波在反射、折射、吸收、散射过程中,不仅其强度发生变化,其偏振状态也往往发生变化,这与目标的形状及特性密切相关,所以电磁波与物体相互作用的偏振状态的改变也是一种可以利用的遥感信息。在光学波段可以用偏振片产生线偏振光。偏振在微波技术中称为“极化”。它对微波雷达是非常重要的,因为水平极化与垂直极化所得到的图像是不同的。在雷达成像技术中,利用了电磁波的不同极化特性,获取更丰富的遥感信息。

电磁波可用以下几个参量描述。

(1) 波长(wavelength):波长指波在一个振动周期内传播的距离,即沿波的传播方向,两个相邻的同相位点(如波峰或波谷)间的距离,用 λ 表示,如图 1.1 所示。波长常用人们熟悉的长度单位来度量,只是往往将之划分得很小,如 m、cm、mm、 μm 、nm 等。

(2) 频率(frequency):频率指单位时间内完成振动或振荡的次数或周期,即在给定时间内,通过一个固定点的波峰数,它常以赫兹(Hz)为单位,用 ν 表示。

在真空中电磁波以光速传播,且它们的波长(λ)与频率(ν)满足如下关系,即

$$C = \nu\lambda \quad (1.6)$$

式中:光速 $C=2.998\times 10^8\text{m/s}$ 。在大气中电磁波小于光速但接近于光速传播。

一般可用波长或频率来描述或定义电磁波谱的范围。例如,在可见光-红外遥感中,多用波长来描述波谱范围,如 μm 、nm 等;而在微波遥感中,多用频率来描述波谱范围,如 Hz、kHz、MHz、GHz 等。当波进入物体时,其频率是不会改变的,但波长将随传播速度的改变而变化。除了用波长、频率表示波谱外,还可以用“波数”来描述,波数被定义为在波的传播方向单位长度内所含波长的数目,即波长的倒数($1/\lambda$),常用 $\bar{\nu}$ 表示,单位常取厘米 $^{-1}$ (cm^{-1})。

(3) 振幅(amplitude):振幅表示电场振动的强度。它被定义为振动物理量偏离平衡位置的最大值,即每个波峰的高度,或每个波长间隔的能量级。振幅的平方与振动的能量成正比。

(4) 其他,如偏振面、传播方向、相位等;所谓相位或称位相(phase)表示某物理量随时间或空间位置作正弦变化时,该量在任一时刻或位置的状态的一个数值。例如,某一作谐振动的量 A ,按照 $A=A_0\sin(\omega t+\theta)$ 的规律发生变化时,其中 $\omega t+\theta$ 就称“相位”,它确定 A 在 t 时刻的数值。 θ 是 $t=0$ 时的相位,称为“初相位”, A_0 和 ω 分别表示 A 的振幅和角频率。

2) 粒子性

电磁波的粒子性是指电磁辐射能除了它的连续波动状态外还能以离散形式存在。其离散单元称为光子(photo)或量子(quanta)。光子或量子是由原子和分子状态改变而释放出的一种稳定、不带电、具有动能的基本粒子。大量实验证明,光照射在金属上能激发出电子,称为光

电子。且光电子的能量与光的强度、光照的时间的长短无关,而仅与入射光的频率有关。即光强仅增加光电子的数量(光子流密度),而光电子的动能只与入射光的频率有关。许多光电器件,如光电倍增管、电视摄像管等,正是运用光电效应原理制作的。

光电效应的这些现象用电磁波理论是无法解释的。按电磁波理论,电子的能量与光强度、光照时间的长短有关,而与频率无关;只要有足够的光强或光照时间总会发生光电效应,这与实验结果不符。但光电效应却是对电磁波“粒子性”的最好说明。

普朗克(Max Planck)发现电磁辐射能量以离散单元形式(光子、量子)被吸收和发射,并用模型来说明光电效应,指出电磁辐射能量的大小直接与电磁辐射的频率成正比,可表示为

$$Q = h\nu \quad (1.7)$$

式中:Q为辐射能量(J); ν 为辐射频率; h 为普朗克常数,取值为 6.626×10^{-34} (J·s)。

代入反映频率与波长关系的式(1.6),则可以把电磁辐射的波模式与量子模式联系起来,表示为

$$Q = hc/\lambda \quad (1.8)$$

此式表明,辐射能量与它的波长成反比,即电磁辐射波长越长,其辐射能量越低。这对遥感是有重要意义的,如地表特征的微波发射要比波长相对短的热红外辐射更难感应。因此对于长波的低能辐射,遥感系统必须采取相应的对策,以尽量获得可探测的能量信号。

电磁波的波动性把电磁振动的传播作为光滑连续的波对待,用强度(振幅)、波长(频率)、偏振(极化)等参量来描述。麦克斯韦理论定义了电磁辐射的波模型,成功地解释了电磁波传播过程的各种现象,如透镜和棱镜的折射与绕射等。对于波动性而言,其强度(光强度)与振幅、频率、光照时间等呈正相关。

电磁波的粒子性把电磁辐射能分解为非常小的微粒子,即离散化、量子化为光子。光子具有一定的能量和动量。对于粒子性而言,其能量的大小与光的强度、光照的时间无关,而仅与入射光的频率有关。光强度决定于单位时间内通过截面的光子数目的多少(即光子流密度)。它只影响光电流的大小,却不改变光电子的最大动能。

经典物理学中,“波”与“粒子”是截然不同的概念——“粒子”是有一定大小和质量的实体,它的运动可以用轨迹来描述;“波”在空间的分布是连续的,它服从叠加原理,从而会产生干涉、衍射等现象;两者难以相互转化。但对于电磁波而言,波动性与粒子性却是对立的统一。电磁波的离散与连续现象往往伴生,或在一定条件下可以相互转化。这便是电磁波的波粒二象性。例如,同一波长的电磁波,在一些实验中粒子性表现得很突出,而在另一些实验中波动性又表现得很突出。即使在光的粒子性很明显的光电效应中,也还保留着某些波动的特性,如频率、波长等概念。又如,电子束和光的单缝衍射实验,我们可以变换为将电子束强度减弱到呈一个个电子通过单缝,或将光子流的强度(光强)减弱到呈一个个光子通过单缝。实验证明,不管是大量电子、光子同时通过还是一个个体通过,只要电子或光子的数量足够大,它们的分布与衍射花纹的分布便存在波动理论所预言的关系,这是一种统计平均的分布。按概率论,波在某时刻,在空间某点的强度就是该时刻在该点找到粒子的几率,即波是粒子流的统计平均;而波动的粒子性反映在波动场的能量、动量的量子化上,即粒子是波的量子化。从统计的观点,可把波与粒子的二象性联系起来。一般说来,电磁波在传播过程中,主要表现为波动性;在与介质相互作用时,主要表现为粒子性;波长较长的电磁波(如微波、无线电波)波动性较为突出,多用Maxwell方程组来描述电磁波与介质的相互作用;而波长较短的电磁波(如光学范畴)更多地表现为粒子性,多用辐射传输方程来描述电磁波与介质的相互作用。

由于电磁辐射传输过程中的量子化和统计学本性,测量辐射能速率的精度总有一定的内

在限制,这种固有的局限性,常迫使人们在辐射定量的遥感测量中对速率与精确度之间采取一定的折中。

3. 电磁辐射的度量

电磁辐射源(电磁振源)以电磁波的形式向外传送能量。任何物体都可以是辐射源。它既可能自身发射能量(即发射辐射,又称热辐射,将在第4章详细论述),又可能被外部能源激发而辐射能量(即反射辐射,将在第3章详细论述)。另外还有紫外辐射、微波辐射等。这就是说,不同辐射源可以向外辐射不同强度和不同波长的辐射能量。电磁辐射是能量的一种动态形式,当它与物质相互作用时,所具有的能量则表现出来,如使被辐射的物体升温、改变物体的内部状态、使带电物体受力而运动等。利用遥感手段探测物体,实际上是对物体辐射能量的测定与分析。它涉及一系列复杂的过程。这里首先对一些常用的基本概念与术语的物理意义作一说明。

- 辐射能量,指物体以电磁波形式向外传送的能量,常用 Q 表示,单位为 J、cal。
- 辐射通量(radiant flux),又称辐射功率,指单位时间内,通过某一表面的辐射能量,常用 ϕ 表示,单位 W,即 J/s,表达式为: $\phi = dQ/dt$ 。
- 辐射出射度(radiant exitance, emittance),又称辐射通量密度,指面辐射源在单位时间内,从单位面积上辐射出的辐射能量,即物体单位面积上发出的辐射通量[图 1.4(a)],常用 M 表示,单位为 W/m^2 ,表达式为: $M = d\phi/dA$ 。
- 辐射照度(irradiance),简称辐照度,指面辐射源在单位时间内,从单位面积上接收的辐射能量,即照射到物体单位面积上的辐射通量[图 1.4(b)],常用 E 表示,单位为 W/m^2 ,表达式为: $E = d\phi/dA$ 。

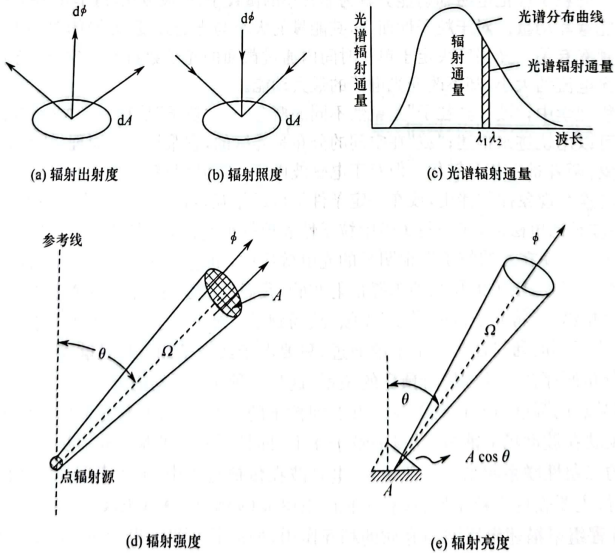


图 1.4 电磁辐射的度量

• 辐射强度(radiant intensity),指点辐射源在单位立体角、单位时间内,向某一方向发出的辐射能量,即点辐射源在单位立体角内发出的辐射通量[图 1.4(d)],常用 I 表示,单位为 W/sr ,表达为: $I = d\phi/d\Omega$ 。若各向同性的辐射源,则 $I = E/4\pi$ 。

• 辐射亮度(radiance),简称辐亮度,指面辐射源在单位立体角、单位时间内,在某一垂直于辐射方向单位面积(法向面积)上辐射出的辐射能量,即辐射源在单位投影面积上、单位立体角内的辐射通量,如图 1.4(e)所示,常用 L 表示,单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,表达为: $L = d^2\phi/dA\cos\theta d\Omega$ 。遥感观测的是辐射亮度值 L 。

需要说明的是,①“立体角”指一个锥面所围成的空间部分。它以锥的顶点为圆心,半径为 1 的球面被锥面所截的面积来度量,常用 Ω 表示,其度量单位为球面度(sr)。 $\Omega = A/R^2$ (R 为球半径, A 为球面积)。一个球体由球心对全球面所张立体角为 4π 球面角($\Omega = 4\pi$);半球面所张立体角为 2π 球面角($\Omega = 2\pi$)。②以上涉及的“面积”均指垂直于入射方向的“法向面积”,严格地说应是 $\cos\theta$ 的关系。③上述各辐射量均是波长的函数。

图 1.4(c)表示单位波长间隔内的辐射通量,称为光谱辐射通量,表达为: $\phi(\lambda) = d\phi/d\lambda$,单位为 $\text{W}/\mu\text{m}$ 。上述各辐射量前面的“光谱”二字常可省略。

辐射亮度 L 与辐射出射度 M 的关系如下。

已知 $L_\lambda = \frac{d^3\phi}{dA\cos\theta d\lambda d\Omega}$, $M_\lambda = \frac{d^2\phi}{dA d\lambda}$, 在极坐标中,微小立体角元(图 1.5): $d\Omega = dA/R^2 = \sin\theta d\theta d\phi$ 。

则 M_λ 与 L_λ 的关系,可表示为

$$M_\lambda = \int_\Omega L_\lambda \cos\theta d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_\lambda \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (1.9)$$

即 M_λ 相当于辐射亮度的法向分量对整个半球面立体角($\Omega = 2\pi$)积分。对于各向同性辐射(朗伯体), L_λ 各向同性,则

$$M_\lambda = L_\lambda \int_{2\pi} \cos\theta d\Omega = \pi L_\lambda \quad (1.10)$$

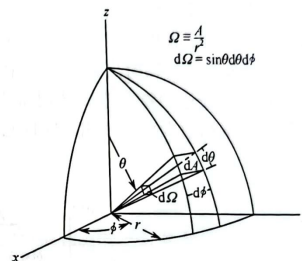


图 1.5 极坐标中的立体角^[3]

1.1.2 电磁辐射定律

为了便于论述,需要简单地了解一下黑体(blackbody)的概念。黑体是个假设的理想辐射体,它既是完全的吸收体,又是完全的辐射体。黑体是朗伯源,其辐射各向同性。自然界的物体仅接近于黑体,进一步的讨论将放在第 4 章进行。电磁辐射遵循以下物理定律。

1. 普朗克(Planck)辐射定律

对于黑体辐射源,普朗克(1900)成功地给出了其辐射出射度(M)与温度(T)、波长(λ)的关系。黑体辐射能量随波长的分布函数可表示为

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/kT} - 1} \quad (1.11)$$

式中: h 为普朗克常数,取值 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; k 为玻耳兹曼常数,取值 $1.3806 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; c 为光速,取值 $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$; λ 为波长(m); T 为热力学温度(K)。

这里的 $M(\lambda, T)$ 也就是所指的普朗克辐射函数 $B(\lambda, T)$,表征波长(λ)、物理温度(T)下的黑体辐射亮度 L 。普朗克辐射定律是热辐射理论中最基本的定律,它表明黑体辐射只取决于温度与波长,而与发射角、内部特征无关。

2. 斯蒂芬-玻耳兹曼(Stefan-Boltzmann)定律

任一物体辐射能量的大小是物体表面温度的函数。斯-玻定律表达了物体的这一性质。此定律将黑体的总辐射出射度与温度的定量关系表示为

$$M(T) = \sigma T^4 \quad (1.12)$$

式中: $M(T)$ 为黑体表面发射的总能量, 即总辐射出射度 (W/m^2); σ 为斯-玻常数, 取值 $5.6697 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$; T 为发射体的热力学温度, 即黑体温度 (K)。

此式表明, 物体发射的总能量与物体绝对温度的四次方成正比。因此, 随着温度的增加, 辐射能增加是很迅速的。当黑体温度增高 1 倍时, 其总辐射出射度将增为原来的 16 倍。在这里我们仅强调黑体的发射能量是温度的函数。

该式是以普朗克公式(1.11)对全波长积分得出温度的指数 $n_k=4$ 。但对于具体的遥感窄波段, 指数 n_k 是随着波长和物体表面温度而变化, 如在 $10 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 的大气窗口处, n_k 的平均值等于 4^[4]; 而 $3 \mu\text{m}$ 处则 $n_{3\mu\text{m}} \approx 13$ ^[5]。这在运用中红外波段数据 ($3 \sim 5 \mu\text{m}$) 进行地表温度反演时需要注意。

以上的讨论已说明了一个物体的发射能量既随温度变化又随波长变化, 如图 1.6 所示。图中显示了各种温度 ($200 \sim 6000 \text{K}$) 的黑体表面辐射能量的波谱分布曲线。纵坐标表示单位波长间隔的辐射出射度。图中曲线以下的面积相当于总辐射出射度 M 。曲线说明斯-玻定律所表达的物理意义, 辐射温度越高, 发射的辐射总量越大。曲线还说明, 这些不同温度的黑体辐射曲线形式相似, 且它们的能量峰值的分布随着温度的升高, 向短波方向移动。

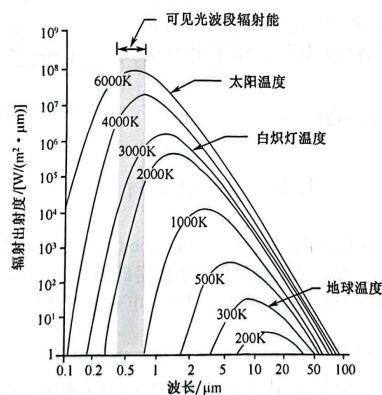


图 1.6 不同温度黑体辐射波谱曲线^[5]

从图 1.6 还可见, 太阳的发射约相当于温度 6000K 黑体的辐射曲线, 白炽灯的发射约相当于温度 3000K 黑体的辐射曲线。两者辐射能量差异较大, 且后者蓝光能量较低, 而不同于太阳光的连续光谱。因此在摄影遥感中, 人们研制不同的胶片, 以适应不同的光照条件。“日光型”是针对户外光照下的, 若将之用于室内灯光下, 因光源不同所得照片显得发黄, 但用上闪光灯, 因补充了高强的蓝光能量, 则照片的效果明显改善。

3. 维恩(Wien)位移定律

维恩位移定律,描述了物体辐射最大能量的峰值波长与温度的定量关系,表示为

$$\lambda_{\max} = A/T \quad (1.13)$$

式中: λ_{\max} 为辐射强度最大的波长(μm); A 为常数,取值为 $2898\mu\text{m} \cdot \text{K}$; T 为热力学温度(K)。

式(1.13)表明,黑体最大辐射强度所对应的波长 λ_{\max} 与黑体的绝对温度 T 成反比,如当对一块铁加热时,我们可以观察到随着铁块的逐渐变热铁块的颜色也从暗红→橙→黄→白色,向短波变化的现象。

表 1.1 列出不同温度 T 所对应的 λ_{\max} 。由表中数据可见,随着黑体温度的升高(或降低),黑体最大辐射峰值波长 λ_{\max} 向短波(或长波)方向变化。例如,地球表层(包括土壤、水、植被等)的平均温度约 300K (27°C),根据维恩位移定律,其相应的最大辐射峰值波长约为 $9.66\mu\text{m}$ 。这部分辐射与热相关,故称为热红外能。人眼虽看不见热辐射能量,也无法对其摄影,但它能被特殊的热仪器如辐射计、扫描仪所感应。这部分内容将在第 4 章专门讨论。太阳的表面温度近似 6000K ,其最大能量峰值波长约为 $0.48\mu\text{m}$,这部分辐射是人眼和摄影胶片均敏感的部位,因而在日光下,我们可以观察到地球特征。

表 1.1 不同温度 T 所对应的 λ_{\max}

T/K	300	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
$\lambda_{\max}/\mu\text{m}$	9.66	5.76	2.88	1.44	0.96	0.72	0.58	0.48	0.41	0.36

4. 基尔霍夫(Kirchhoff)定律

基尔霍夫定律可表述为,在任一给定温度下,物体单位面积上的出射度 $M(\lambda, T)$ 和吸收率 $\alpha(\lambda, T)$ 之比,对于任何地物都是一个常数,并等于该温度下同面积黑体辐射出射度 $M_b(\lambda, T)$,即

$$M(\lambda, T)/\alpha(\lambda, T)=M_b(\lambda, T) \quad (1.14)$$

也就是说,在一定的温度下,任何物体的辐射出射度与其吸收率的比值是一个普适函数,即黑体的辐射出射度。这个比值是温度、波长的函数,与物体本身的性质无关。

式(1.14)也可表示为

$$\alpha(\lambda, T)=\frac{M(\lambda, T)}{M_b(\lambda, T)}=\epsilon(\lambda, T) \quad (1.15)$$

基尔霍夫定律也可表述为,在热平衡条件下,物体的吸收率等于其比辐射率 $\epsilon(\lambda, T)$,又称发射率(参见第 4 章热红外遥感的相关内容)。

§ 1.2 电磁波与地-气的相互作用

电磁波从辐射源到传感器之间的传输过程中,要经历吸收、再辐射、反射、散射、偏振及波谱重新分布等一系列过程。电磁波传输中的变化取决于它与有关介质所发生的相互作用。电磁波与大气的相互作用可认为是体效应,而与地表的相互作用则主要是与地表或浅层地表的表面效应。了解这种相互作用的机理和过程,对我们认识所获得的遥感数据以及地物目标的特性是至关重要的。

1.2.1 能源——太阳辐射与地球辐射

1. 太阳辐射

太阳是一个电磁辐射源,是遥感的主要能量来源。作为一个炽热气体球的太阳,其中心温度约 $15 \times 10^6 \text{K}$,表面温度约 6000K 。太阳辐射的总功率为 $3.826 \times 10^{26} \text{W}$,太阳表面的辐射出射度为 $6.284 \times 10^7 \text{W/m}^2$ 。太阳的辐射波谱从 X 射线一直延伸到无线电波,是个综合波谱。

表 1.2 是太阳辐射能各谱段的百分比。从表中可见,太阳辐射的大部分能量集中于近紫外-中红外 ($0.31 \sim 5.6 \mu\text{m}$) 区内,占全部能量的 97.5%,其中可见光占 43.5%、近红外占 36.8%。而近紫外-短波红外 ($0.31 \sim 2.5 \mu\text{m}$),占全部能量的 95% 左右。由此可见,太阳辐射主要为短波辐射。在此光谱区内太阳辐射的强度变化很小,可以当做很稳定的辐射源;而 X 射线、 γ 射线、远紫外及微波波段的太阳辐射能小于 1%,它们受太阳黑子及耀斑的影响,强度变化很大,主要影响地球电离层或通信,这里不予讨论。

表 1.2 太阳辐射能各谱段的比例^[2]

λ	波 段	比例%
$<10 \text{\AA}$	X 射线、 γ 射线	0.02
$10 \sim 2000 \text{\AA}$	远 紫 外	
$0.20 \sim 0.31 \mu\text{m}$	中 紫 外	1.95
$0.31 \sim 0.38 \mu\text{m}$	近 紫 外	5.32
$0.38 \sim 0.72 \mu\text{m}$	可 见	43.50
$0.72 \sim 1.5 \mu\text{m}$	近 红 外	36.80
$1.5 \sim 5.6 \mu\text{m}$	中 红 外	12.00
$5.6 \sim 1000 \mu\text{m}$	远 红 外	0.41
$>1000 \mu\text{m}$	微 波	

到达地球大气外边界的太阳辐射,约 30% 被云层和其他大气成分反射返回太空;约有 17% 的太阳能入射辐射被地球大气吸收;还有 22% 被散射并成为漫射辐射到达地球表面。因此,在进入地球外边界的太阳辐射中仅有 31% 作为直射太阳辐射到达地球表面^[7]。

从图 1.7 可见,地球大气层以外的太阳光谱辐照度曲线为平滑的连续光谱曲线,它近似于 6000K 的黑体辐射曲线。但由于大气的影响(主要指大气成分的吸收作用),使太阳的光谱结构变得复杂。

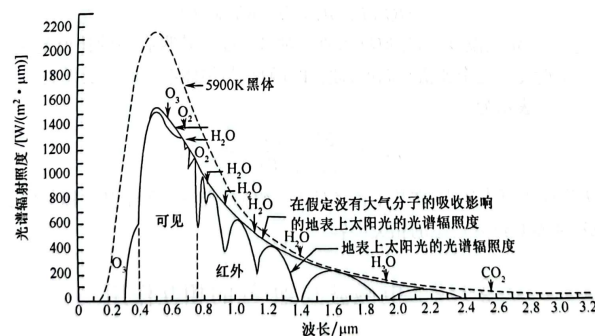


图 1.7 地球表面的太阳辐照度曲线^[2]

地面接收的太阳辐照度与太阳天顶角 θ 有关。在忽略大气损失的情况下,可近似认为地面辐照度 E 与 $\cos\theta$ 成正比。

$$E = \frac{E_0}{D^2} \cos \theta \quad (1.16)$$

式中: E_0 是太阳常数, 一个描述太阳辐射能流密度的物理量。它指地球处于日地平均距离处, 单位时间内, 垂直于太阳射线的单位面积上, 所接收到的全部太阳辐射能, 其平均值为 $1.36 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ 。此值实际为大气层顶部(TOA)太阳光的光谱辐照度在全波段范围内的积分值。 D 是以日地平均距离为单位的日地之间的距离(一个天文单位)。 θ 是太阳天顶角(与法线的夹角)。当 θ 为某地正午时分太阳天顶角时, E 为到达某地的最大地面辐照度 E_{\max} 。

由于地球的公转与自转, 到达地球任一点的太阳总辐射随时间呈近似正弦形式的变化, 即^[2]

$$E_i = E_{\max} \sin(\pi t/N) \quad (1.17)$$

式中: t 为日出到 E_i 时刻的时间间隔; N 为理论日照时数。

太阳天顶角随纬度、季节、时间等因素而变化, 可通过式(1.18)计算, 即

$$\cos \theta = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t \quad (1.18)$$

式中: φ 为地理纬度; δ 为太阳赤纬, 赤纬指太阳光与地球赤道平面的夹角, 一年内 δ 在 $\pm 23^\circ 27'$ 范围内变动, 春分、秋分时, 太阳直射赤道, $\delta = 0$; 夏至时太阳直射北回归线, $\delta = 23^\circ 27'$; 冬至时太阳直射南回归线 $\delta = -23^\circ 27'$ 。一年内赤纬的变化值可从有关表中查得。 t 为太阳的时角, 定义为地方时 12 点的时角 t 为 0, 6 点 t 为 $-\frac{\pi}{2}$, 18 点 t 为 $+\frac{\pi}{2}$ 。

式(1.18)中, 第一项表示季节变化对天顶角的影响; 第二项则表示一天内天顶角随时间 t 的变化。高纬度地区 $\sin \varphi$ 大, 所以天顶角随季节的变化较大, 而随日变化较小; 低纬度地区则相反, $\sin \varphi$ 小, $\cos \varphi$ 大, 天顶角随季节变化不大, 而随日变化较大^[2]。这就是说, 太阳辐照度是太阳天顶角 θ 和纬度 φ 的函数。地面接收的太阳辐照度还与大气的吸收及散射有关。

到达地面的太阳入射辐射分为: 太阳直接辐射(sunlight or beam, E_s)和大气散射辐射(diffuse radiation, E_d)。地面接收的太阳总入射辐射为 $E_i = E_s + E_d = Q$ 。因此也可以说, 太阳总辐射 Q 是纬度、时间及云的函数。入射到地面的太阳总辐射 Q 可利用气象站的太阳光度计、太阳直射辐射表、天空辐射表来确定, 也可通过理论太阳辐射及日照率的计算获得, 即

$$Q = Q' (0.1144 + 0.5683C/C_0) \quad (1.19)$$

式中: Q' 为大气层顶的理论太阳总辐射, 与气象台站经纬度、太阳赤纬、日地距离和太阳常数有关; C/C_0 为日照率, C 为日照时数, C_0 为最大可能日照时数。

2. 地球辐射

地球辐射可分为: ①长波辐射($6\mu\text{m}$ 以上), 指地表物体自身的热辐射, 在此区域内太阳辐射的影响极小; ②短波辐射($0.3 \sim 2.5\mu\text{m}$), 指地球表面对太阳的反射辐射, 地球自身的热辐射可忽略不计; ③介于两者之间的中红外辐射($2.5 \sim 6\mu\text{m}$), 既有对太阳辐射的反射又有地球自身的热辐射, 其影响均不能忽略(图 1.8)。对于地球的短波辐射的反射辐射而言, 其辐射出射度 M 与太阳辐照度 E 、地物反射率 ρ 及波长 λ 有关, 即 $M(\lambda) = \rho(\lambda)E(\lambda)$ 。这部分内容将在后面专门讨论。

被地表吸收的太阳辐射能, 又重新被地表辐射。从维恩位移定律可知, 比太阳温度低得多的地球必然辐射更长波段的辐射。太阳在 6000K 最大辐射强度在 $0.48\mu\text{m}$ (可见光绿波段), 地球在 300K 最大辐射强度在 $10\mu\text{m}$ 附近(远红外波段)。

对于地球的长波辐射而言, 其辐射出射度 M 与地物的比辐射率 ϵ 、地物的温度 T 及波长 λ

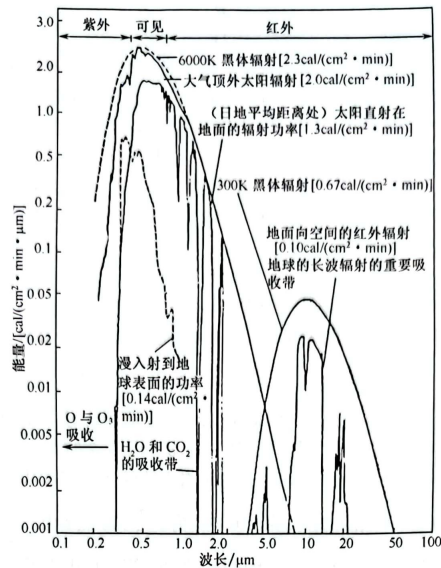


图 1.8 太阳与地球的辐射波谱^[2]

1cal=4.1868J

有关,可用式(1.20)表示:

$$M(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) \cdot M_b(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) \cdot \sigma T^4 \quad (1.20)$$

式中: M_b 为黑体的辐射出射度; σ 为斯-玻常数。

地球上的能源来自太阳辐射,包括太阳直射能量(太阳直射光)与天空漫入射的能量(天空光或天空漫射光)。但入射到地面的太阳短波辐射能量($R_s \downarrow$ 或 Q)中的一部分被地面反射($R_s \uparrow$),地面实际吸收的太阳短波辐射能量为

$$R_s \downarrow - R_s \uparrow = (1 - \alpha) R_s \downarrow = (1 - \alpha) Q \quad (1.21)$$

式中: α 为地表全波段的反射率(即反照率)。在吸收太阳辐射能的同时,地表也向外界发射长波辐射能量 $R_L \uparrow$,而大气的长波辐射 $R_L \downarrow$ 对地表也有贡献。因此地表的净辐射收入 R_n (或 Q_n) 为

$$R_n = (1 - \alpha) R_s \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow \quad (1.22)$$

一般说来,白天地面收入大于支出,净收入 R_n 为正,地面温度不断升高。净收入的大小与地表的反射率有关。辐射的净收入能量不全用于地表加热,其中一部分能量以传导与对流形式使大气加热,一部分能量供给水在物态转换时(如蒸发、凝结、升华、融化、结冰等)所需的潜热,其能量大小与微气候因素,如风速、湿度、温度等有关。若地面有植被,还需考虑植物光合作用吸收的能量,扣除上述的这几部分能量,才是真正的地表温度变化的能量。地表温度的变化除与地面能量收支情况有关外,还与物质本身的热学性质有关。这部分内容将在第 4 章和第 14 章专门讨论。

1.2.2 电磁波与大气的相互作用

1. 大气概况

地球的大气层并没有一个确切的界限。只是离地球越远,空气越稀薄,以至于近似真空而进入星际太空。大气层的厚度一般可取 1000km,约相当于地球直径的 1/12。大气按热力学性质可垂直分为对流层、平流层、中间层、电离层。

对流层(troposphere)的上界往往随纬度、季节等因素而变化,极地上空仅 7~8km,赤道上空 16~19km。对流层有明显的上下混合作用,主要的大气现象几乎都集中于此。在该层内每上升 1km,温度下降约 6.5K,空气密度和气压也随高度上升而下降。

平流层(stratosphere)的范围是从对流层顶至 50km。它包括底部的“同温层”(延至 20km)和随高度上升温度缓慢上升的“暖层”。这是因为臭氧吸收紫外光的缘故。层内除季节性的风外,几乎没有什么天气现象。

中间层(mesosphere)的范围约 50~80km。它们介于上下两个暖层之间,又称“冷层”。其温度随高度的增加而递减,平均每上升 1km 温度下降约 3K。大约在 80km 处降到最低点,约 -95℃,也是整个大气层温度最低点。

电离层(thermosphere),又称增温层,是大气的最外层,高度 80~1000km。层内空气稀薄,温度很高,可达 1500K。因太阳辐射作用而发生电离现象,无线电波在该层发生全反射现象。

大气主要由多种气体和悬浮微粒组成。大气中的气体主要有氮、氧(约占 99%)和各种微量气体,如二氧化碳、甲烷、氧化氮、氢、臭氧等。除臭氧外,这些气体分子在 80km 以下相对比例基本不变;水汽约占大气总量的 0.3%,在大气中浓度变化很大,尤其是在低层大气。悬浮微粒具有重要光学效应的悬浮微粒指半径 0.01~20μm,比分子大得多的大气粒子,如霾、尘埃、液态水(水滴——云雾、降雨)和固态水(冰粒)等,其中大气气溶胶是指悬浮于地球大气之中,具有一定稳定性、沉降速度小、尺度在 10^{-3} ~10μm 的液态及固体粒子,主要集中在紧靠地面 0~4km 范围的大气层中。

大气的密度和压力随着高度上升几乎均按指数率下降。高度每增加 16km,其大气密度和压力都下降约 10%。在 32km 以上,大气质量仅剩下 1%,所以在 32km 以上的大气影响可以忽略不计。因此可以认为,有效大气层是紧贴地球表面的薄薄一层。

2. 大气效应

所有用于遥感的辐射能均要通过地球的大气层。其路径长度变化很大,若空中摄影利用太阳光源,则需要二次通过大气层;而红外辐射仪直接探测地物的发射能量,它仅一次通过大气层,且路径的长度取决于遥感器距离地面的高度。若遥感器载于低空飞机上,大气对图像质量的影响往往可以忽略;但星载遥感器所获得的能量均需穿过整个大气层,经大气传输后,其强度和光谱分布均会发生变化。大气净效应取决于路径长度、电磁辐射能量信号的强弱、大气条件以及波长等,它对遥感图像和数据质量均有重要的影响。因此,遥感应用研究必须了解电磁波与大气的相互作用。电磁波与大气的相互作用主要有两种基本的物理过程——大气散射和大气吸收,其他作用如大气折射等,可忽略不计。至于大气本身的热辐射将在第 4 章“热红外遥感”中专门讨论。

1) 大气散射

电磁波在非均匀介质或各向异性介质中传播时,改变原来传播方向的现象称为散射。大气散射是电磁辐射能受到大气中微粒(大气分子或气溶胶等)的影响而改变传播方向的现象,其散射强度依赖于微粒的大小、微粒的含量、辐射波长和能量传播穿过大气的厚度。散射的结果改变辐射方向,产生天空散射光,其中一部分上行被空中遥感器接收,一部分下行到达地表,大气的散射主要有以下几种形式。

A. 选择性散射——散射强度与波长有关

(1) 瑞利(Rayleigh)散射。当引起散射的大气粒子直径远小于入射电磁波波长($d \ll \lambda$)时,出现瑞利散射。大气中的气体分子 O_2 、 N_2 等对可见光的散射属此类。它的散射强度与波长的 4 次方成反比。波长越短、散射越强,且前向散射(指散射方向与入射方向夹角小于 90° ,即顺入射方向的散射)与后向散射(逆入射方向的散射)强度相同。瑞利散射多在 9~10km 的晴朗(无云、能见度很好)高空发生。其辐射衰减几乎全是由它引起的。“蓝天”正是瑞利散射的一种表现。当日光与大气相互作用时,其可见光的蓝光散射要比可见光其他波段的散射强得多(表 1.3),因而天空呈现天蓝色。然而当日出、日落时,太阳接近地平线,太阳高度角低,太阳光线穿过大气层路径变长,大气衰减作用增强,以至于人们仅能看到波长较长的太阳透射光(橙红光),因而天空呈现橙红色。

表 1.3 波长与散射率的关系

颜色	红	橙黄	黄	绿	青蓝	紫	紫外线
波长/ μm	0.7	0.62	0.57	0.53	0.47	0.4	0.3
散射率	1	1.6	2.2	3.3	4.9	5.4	30.0

瑞利散射是造成遥感图像辐射畸变、图像模糊的主要原因。它降低了图像的“清晰度”或“对比度”。对于彩色图像则使其带蓝灰色,特别是对高空摄影图像影响更为明显。因此,摄影像机等遥感器多利用特制的滤光片,阻止蓝紫光透过以消除或减少图像模糊,提高影像的灵敏度和清晰度。当然也有某些特定的遥感应用专门采用紫外辐射。

(2) 米氏(Mie)散射。当引起散射的大气粒子的直径约等于入射波长($d \cong \lambda$)时,出现米氏散射。大气中的悬浮微粒——霾、水滴、尘埃、烟、花粉、微生物、海上盐粒、火山灰等气溶胶的散射属此类。米氏散射往往影响到比瑞利散射更长的波段,可见光及可见光以外的广大范围。它的效果依赖于波长,但不同于瑞利散射的模式,其前向散射大于后向散射。

米氏散射与大气中微粒的结构、数量有关,其强度受气候影响较大。在大气低层 0~5km 范围内,散射最强,这儿微粒更大,数量更多。尽管在一般大气条件下,瑞利散射起主导作用,但米氏散射能叠加于瑞利散射之上,使天空变得阴暗。

B. 无选择性散射——散射强度与波长无关

当引起散射的大气粒子的直径远大于入射波长($d \gg \lambda$)时,出现无选择性散射,其散射强度与波长无关。大气中云、雾、水滴、尘埃的散射属此类。它们一般直径为 5~100 μm ,并大约同等地散射所有可见光、近红外波段。正因为此类散射对所有可见光区段蓝、绿、红光的散射是等量的,因而,我们观察云、雾呈白色、灰白色。

大气散射辐射对遥感、遥感数据传输的影响极大。大气散射降低了太阳光直射的强度,改变了太阳辐射的方向,造成遥感图像辐射畸变,削弱了到达地面或地面向外的辐射,产生了漫反射的天空散射光(又叫天空光或天空辐射),增强了地面的辐照和大气层本身的“亮度”,使地

面阴影呈现暗色而不是黑色,使人们有可能在阴影处得到物体的部分信息,并使暗色物体表现得比它自身的要亮,使亮物体表现得比它自身的要暗。因此,它降低了遥感影像的反差(对比度),降低了图像的质量(清晰度)以及图像上空间信息的表达能力。

大气散射对低层大气(约低于 3km)尤为重要。这是与大气粒子的粒径、含量及有效性的增加密切相关的。例如,大气中的吸湿性粒子是一种强散射体,随着大气湿度的增加,散射作用大大增强,大气透明度变差。此外,大气团和气压系统的变化,使大气的湿度、温度及循环模式发生变化,影响到大气中灰尘、污染物和其他散射体的集中或分散,从而造成大气透明度发生明显变化。

2) 大气吸收与大气窗口

除大气散射外,电磁辐射能穿过大气时,还受到大气分子等的吸收作用,而使能量衰减。大气中有 3 种气体对太阳辐射能的吸收最有效。它们是臭氧(O_3)、二氧化碳(CO_2)和水汽(H_2O)。

臭氧(O_3)主要集中于 20~30km 高度的平流层。它是由高能的紫外辐射与大气中的氧分子(O_2)相互作用生成的。 O_3 除了在紫外区段(0.22~0.32 μm)有个很强的吸收带外,在 0.6 μm 附近有一个弱吸收带,在远红外 9.6 μm 附近也有个强吸收带。虽然 O_3 在大气中含量很低,只占 0.01%~0.1%,但是 O_3 对地球能量平衡起重要作用, O_3 的吸收,阻碍了低层大气的辐射传输。

二氧化碳(CO_2)主要分布于低层大气。其在大气中的含量仅占 0.03%左右,人类的活动使之含量有所增加。 CO_2 在中—远红外区段(2.7 μm 、4.3 μm 、14.5 μm 附近)均有强吸收带。其中最强的吸收带出现在 13.5~17.5 μm 的远红外段。

水汽(H_2O)一般出现在低空。大气中水汽的作用不同于 O_3 、 CO_2 。它的含量随时间、地点的变化很大(0.1%~3%),而且水汽的吸收辐射是所有其他大气组分的吸收辐射的几倍。最重要的吸收带在 2.5~3.0 μm 、5.5~7.0 μm 和 >27.0 μm (在这些区段,水汽的吸收可超 80%),其中以 6.3 μm 为中心的强吸收成为遥测大气水汽廓线的主要手段。在微波波段水汽在 0.94mm、1.63mm 及 1.35cm 处有三个吸收峰。

由于这些气体往往以特定的波长范围吸收电磁能量。因此,它们对任何给定的遥感系统影响很大,吸收的多少与波长有关。大气的选择性吸收,不仅使能量衰减、气温升高,而且使太阳发射的连续光谱中的某些波段不能传播到地球表面。

图 1.9 为大气吸收与大气窗口示意图。图中表示地球大气的吸收作用引起的透过率与波长的关系。大气分子的吸收,使大气的透过率下降。考虑到各种气体吸收的综合影响,仅有某些波段大气的吸收作用相对较弱,透过率较高。这些使能量较易透过的波段叫大气窗口。大气窗口的位置、范围及有效性取决于大气中主要吸收气体的吸收光谱。对于地面遥感而言,只有位于大气窗口的波段才能被用于生成遥感图像。在可见光—红外区段,常用的大气窗口有:0.3~1.3 μm 、1.5~1.8 μm 、2.0~2.6 μm 、3.0~4.2 μm 、4.3~5.0 μm 、8~14 μm 。在微波区段,主要采用的大气窗口为 8mm 附近和频率低于 20GHz 的波段。但对于大气遥感而言,这些大气吸收波段可以提供大气自身的温度、水汽、臭氧等随高度的分布等状态信息,是大气科学研究的重要信息源之一。

3) 大气衰减

大气衰减指电磁波在大气中传播时,因大气的吸收和散射作用使强度减弱。由此而引起

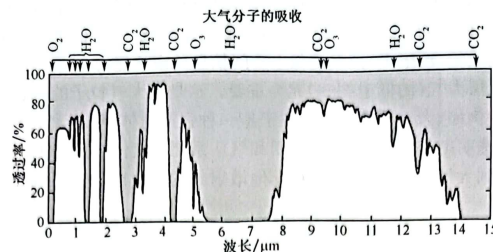


图 1.9 大气吸收与大气窗口^[6]

的光线强度的衰减,又称消光,可用衰减系数 k 和透过率 τ 表示为

$$\tau = \frac{E'}{E_0} = e^{-kx} \quad (1.23)$$

式中: E_0 为太阳辐照度; E' 为经大气路径 x ($x = h/\cos\theta$) 衰减后的辐照强度, $E' = E_0 e^{-kx}$; k 为衰减系数(即消光系数),单位为 m^{-1} ,它是吸收系数 α 与散射系数 r 之和; kx 为光学厚度或光学深度,当辐射强度减弱到 $1/e$ 时,光学厚度定义为 1。大气透过率 τ ,一般晴天时约为 0.7,阴天时约为 0.4。在定量遥感中,大气对太阳辐射的衰减也常以光学厚度表示。

大气衰减的数值取决于大气状况及电磁波的波长。对于可见光波段而言,在大气窗口内的能量衰减主要因散射引起,其吸收的能量仅占衰减能量的 3%;但对更长的波段,大气的主要影响是吸收,而不是散射;对于热红外波段,大气自身的发射是大气效应中重要的部分,对信号的影响也很大(将在第 4 章另作说明)。

图 1.10 显示了太阳辐射与大气、地面相互作用后到达传感器的太阳反射辐射能的基本状况。对于太阳短波辐射而言,大气效应以两种方式影响着传感器所记录的地面目标的辐射亮度值。一是大气的吸收、散射作用使到达地面目标的太阳辐射能量和从目标反射的能量均衰减;二是大气本身作为一个散射体的程辐射(path radiance)使能量增加,它与所探测的地面信息无关。

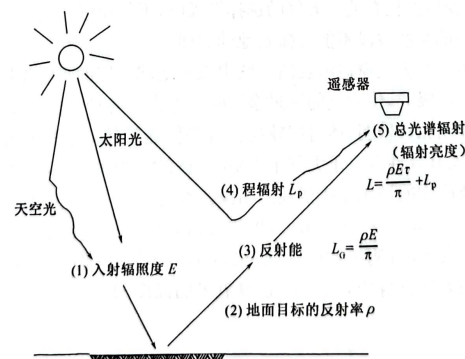


图 1.10 太阳辐射与大气的相互作用^[6]

空中遥感器所测得的地面目标的总辐射亮度 L , 应是经大气衰减后的地面目标辐射亮度 $L_G \tau$ 和大气本身的程辐射 L_p 之和。可用数学的方式来表达这两种大气效应, 其表达式为

$$L = L_G \tau + L_p \quad (1.24)$$

式(1.24)忽略了天空辐射对地面的多次散射。考虑到太阳辐射在光学波段可以看作各向同性, 若地面为朗伯体 (L_G 各向同性), 地面辐射出射度 M 与辐射亮度 L_G 的关系为 $M = \pi L_G$, 已知 $M = \rho E$, 则地面目标辐射亮度为 $L_G = \rho E / \pi$, 代入式(1.24)则得

$$L = \frac{\rho E \tau}{\pi} + L_p \quad (1.25)$$

式中: L 为被遥感器测得的总光谱辐射值(辐射亮度); L_G 为地面目标的辐射亮度; ρ 为地面目标的半球反射率; τ 为大气透过率; E 为地面目标的辐照度; L_p 为大气的程辐射(与目标无关)。

图 1.10 还说明, 经大气衰减的地面辐照度 E 来源于太阳直射光 E_s 和天空漫射光 E_d , 即 $E = E_s + E_d$ 。后者为被大气散射的太阳光。它们与天气状况(如晴朗、多雾、多云等)、大气层厚度等有关。此外, 辐照度还随太阳天顶角及日地距离的变化而变化。根据式(1.16), 再考虑大气衰减作用, 则得

$$E_s = \frac{E_0}{D^2} \cos \theta \cdot \tau \quad (1.26)$$

式中: E_0 为太阳常数; D 为以日地平均距离为单位的日地距离; τ 为整个大气的透过率; θ 为太阳天顶角。

则

$$L_G = \frac{\rho}{\pi} \left(\frac{E_0}{D^2} \cos \theta \cdot \tau + E_d \right) \quad (1.27)$$

这里的 E_0 、 E_s 、 E_d 、 τ 、 ρ 等大多数参数均是波长、空间、时间的函数, 且部分与大气状况及观察角度等有关。

需要说明的是: ①天空散射光 (E_d) 也是一种辐射源。它与地面的多次散射, 往往在大气纠正中被忽略。但事实上, 它对地面目标反射的影响并不小, 如雪被覆盖区反射率高达 90%, 地面上总辐照度的 1/4 是积雪表面反射再经大气散射回到地面的^[4]。②相邻像元的交叉辐射对目标像元辐射亮度的影响, 称之为邻近效应(adjacency effects)。它的大小不仅取决于像元的大小和像元间的亮度反差, 还与波长有关。③严格地说, 大气效应包含大气自身的热辐射作用, 只是大气长波辐射与短波辐射的传输机理不同, 且更为复杂, 因此分别加以论述。

3. 大气校正

遥感所利用的各种辐射能(这里主要指太阳短波辐射能)均要与地球大气层发生相互作用, 或散射、或吸收, 而使能量衰减, 并使光谱分布发生变化。大气的衰减作用对不同波长的光是有选择性的, 因而大气对不同波段的图像的影响是不同的。另外, 太阳—目标—遥感器之间的几何关系不同, 则所穿越的大气路径长度不同, 使图像中不同地区地物的像元灰度值所受大气影响程度不同, 且同一地物的像元灰度值在不同获取时间所受大气影响程度也不同。这对于大扫描角度遥感数据尤为明显。消除大气对遥感信号影响的处理, 称为大气校正, 或大气纠正。大气校正是遥感影像辐射校正的主要内容, 是获得地表真实信息必不可少的一步, 对定量遥感尤为重要。当然, 在有些图像分类、专题提取、变化检测等遥感应用研究中, 往往大气校正并非必要。

目前, 国内外已提出了不少大气校正模型与方法, 大致可以归纳为以下几种。

1) 基于图像特征模型

此类大气校正方法,通过简单的假设(假设整幅图像的大气散射影响均一),不需要进行实际地面光谱及大气环境参数的测量,而仅利用遥感图像自身的信息对遥感数据进行“标定”。

A. 暗目标法(dark-object subtraction method, DOS)(或“零反射地表假设”)

暗目标法假设待校正的遥感图像上存在暗目标(反射率为0或者非常小)区域。例如,把图像中“清水”当做暗目标,假设“清水”的反射率为0($L_0=0$),则传感器接收到的“清水”辐射(L)全部来自大气,将水体的像元值直接取代大气程辐射(L_p),便可将遥感图像中来自地表的辐射和来自大气的辐射分离。若图像中无“清水”,也可把“浓密植被”当做暗目标,其红、蓝波段的反射率很低(或为0),并与中红外波段的反射率有相关性(近似固定的比率),则可大大简化大气校正模型。例如,DDV法假设浓密植物在Landsat蓝波段TM1和红光波段TM3是黑体,TM7($2.2\mu\text{m}$)对多数气溶胶是透明的,则TM7表面反射和大气层顶部(TOA)的表面反射相等^[9];再如,MODIS-7波段($2.1\mu\text{m}$)气溶胶的影响可忽略不计,且第3波段($0.47\mu\text{m}$)、第1波段($0.66\mu\text{m}$)的反射率分别是第7波段的1/2和1/4,由此可推断出逐个像元的反射率,并进一步反演气溶胶光学厚度。

B. 直方图调整

直方图调整又称简单的大气散射补偿法,即全图像像元亮度值减去一个辐射偏置量,该值或是图像直方图的最小亮度值,或是直方图的开端与非零辐射值的第一个0.01%之间的距离,将该辐射偏置值作为该图像的程辐射值。

以一幅图像的直方图为基础,使原图像的灰度(亮度值)分布与参考图像的灰度分布情况相近(即转换一幅图像的直方图,使其和另一幅图像的直方图形状相似,称之为直方图匹配)。从算法设计上是寻找一个灰度级变换函数。一般是建立两个图像均值和方差之间的线性关系,如

$$DN_{\text{corr}} = \mu_1 + (DN_2 - \mu_2) \cdot \sigma_1 / \sigma_2 \quad (1.28)$$

式中: DN_{corr} 为校正后图像的亮度值; DN_2 为参考图像的亮度值; μ_1 、 σ_1 分别为原始图像的均值和方差; μ_2 、 σ_2 分别为参考图像的均值和方差。

C. 图像波段间的数学变换

如NDVI、ARVI(大气阻抗植被指数)等,均经亮度值的归一化处理,可部分纠正大气程辐射和因大气路径长度不同而产生的变形差异;内在平均相对反射率模型(IARR),根据整幅图像的光谱平均值对图像归一化处理,再计算每个像元光谱曲线和平均光谱曲线的比值等。

基于图像特征方法往往假设地表为朗伯体、大气水平均一,不同时间、不同波段的图像间存在线性相关等,因此仅适于较小范围,且校正后的图像均存在不同程度的噪声,如暗目标法未考虑透率的影响,未考虑气溶胶厚度的空间异质性,未考虑观测角度(大气散射是观测角的函数),未考虑暗目标地表的方向反射率,因此不能用于宽视场的图像。

大气校正是相当复杂的。但是,在许多遥感应用中,或者假如有关大气状况的信息不足的情况下,往往并不一定需要绝对的辐射校正,这种基于图像的相对校正,可满足多时相图像数据间的可比性,满足部分应用的需求,但不能满足定量遥感(参数反演等)的要求。

2) 地面线性回归经验模型(又称地面同步法)

即获取遥感影像上特定地物的灰度值及其成像时(同步)相应的地面目标反射光谱的测量

值,建立两者之间的线性回归方程式,在此基础上对整幅遥感图像进行辐射灰度纠正。该模型计算简单、适用性强,但需进行实地同步定标点的光谱测量,且对地面定标点的要求较严格。一般定标点(特定地物)选取要求是反射率或温度“不变”的目标,如高温、高反射率的裸露沙地,中温、中反射率的均匀草地,低温、低反射率的水体等;且目标为均匀平坦表面、面积足够大,一般面积大于1个像元,2×2像元为好,但不宜过大;天气条件要求总云量小于2,风速小于3m/s,能见度大于5km。此法未考虑多次散射作用和邻近效应,不适用于混浊大气。

若无地面同步实测数据,可以采用“不变地物”的相对纠正法(invariant-object methods),即假设图像上有若干个(3个以上)空间明确、光谱辐射稳定的“不变地物”(pseudo-invariant features, PIFs),且对应不同时相、不同波段图像的这些“不变地物”反射率之间存在线性相关,则可以通过求解线性方程组得到大气参数,进而达到整幅图像大气校正的目的。需要注意的是,为了避免方程的相关性,需要选择高、中、低反射率的“不变地物”。该方法假设整幅图像的大气状况相同,图像的观测角也相似,适用于多时相序列影像的标准化校正(参看第9章“变化检测”的辐射纠正)。

3) 大气辐射传输理论模型

大气辐射传输方程是描述电磁波在大气散射、吸收、发射等过程中传输的基本方程。电磁辐射能量在大气辐射传输过程中产生的正、负变化,可以分别表示为如下^[10]。

A. 大气吸收与散射的消光作用(能量减少)——大气衰减效应

$$dI = -\rho \cdot k \cdot I \cdot ds \quad (1.29)$$

式中: dI 为辐射亮度的变化部分(能量的变化量); I 为入射辐射亮度; ρ 为吸收/散射物质的密度; k 为消光系数(即衰减系数),包括吸收系数与散射系数之和; ds 为光路长。

B. 大气热辐射作用(能量增加)

$$dI = +\rho \cdot j \cdot ds = +\rho^2 \cdot B(T) \cdot ds \quad (1.30)$$

式中: B 为普朗克函数; ρ 为吸收物质密度; T 为大气的热力学温度(K); j 为发射系数, $j = \rho \cdot B(T)$ 。

C. 天空散射作用,使非目标物能量被接收(能量增加)——大气程辐射效应

$$dI = +\omega_0 \frac{k}{4\pi} \rho^2 \cdot ds \int_0^{4\pi} P(\Omega, \Omega') I(\Omega') d\Omega' \quad (1.31)$$

式中: ω_0 为单次散射反照率; ρ 为散射物质密度; P 为散射相位函数(描述散射场角分布的散射相函数); Ω 为入射方向立体角; Ω' 为散射方向立体角; k 为消光系数。

实际上,这里的大气程辐射效应包括了大气对太阳的单次(后向)散射及与目标相互作用的多次散射。对于可见光与近红外波段,大气程辐射项主要来源于大气对太阳辐射的多次散射;对于热红外波段,多次散射可以忽略不计;对于中红外波段,则既需要考虑地表与大气自身的发射,同时又要考虑大气的多次散射作用,更为复杂(暂不讨论)。大气程辐射是波长 λ 、大气路径 x 、光学厚度 kx 、入射和观测角度、大气状况(散射体大小)的函数。

归纳式(1.29)~式(1.31),可得

$$\frac{dI}{ds} = \rho^2 B(T) + \omega_0 \frac{k}{4\pi} \rho^2 \int_0^{4\pi} P(\Omega, \Omega') \cdot I(\Omega') \cdot d\Omega' - \rho \cdot k \cdot I \quad (1.32)$$

大气辐射传输模型能较合理地描述大气散射、大气吸收、发射等过程。通常可以从大气辐射传输方程中,反演出被探测参数的数值或沿路径的分布。若大气状态已知(消光、发射可计算的话),就可求出地表状态(垂直地面的辐射亮度);若已知地面状态,则可求出大气状态。但

是,它需要对一系列的大气环境参数(如大气光学厚度、温度、气压、湿度、大气分布状况等)进行测量,且校正模式的准确性决定于输入的大气参数的准确性。

由于大气参数的随机性和非均匀分布,尤其是在大气散射中起决定作用的气溶胶含量,以及在大气吸收中起决定作用的水汽含量这两个关键参数时空变化很大,给大气参数的精确测定与计算增加了难度。目前,大气校正中大气参数的获取途径有:通过大气垂直探测器(TOVS等)专门采集大气参数(如大气水汽、温度、气压的垂直分布等),其反演的大气温度垂直廓线误差小于+2.0K、大气水汽垂直廓线误差小于+20%^[11];通过地面气象台站、空中气球的仪器测量来确定部分大气参数;用不同的标准大气模型(如“中纬度夏季模型”)、气溶胶模型(由长期实验数据积累和理论研究归纳而成);借助大气辐射传输方程来推算大气参数(如 τ 、 L_p 、气溶胶光学厚度)^[12,13]等。为了提高大气参数的测定精度,还设计和发射了一系列有针对性、专门采集大气参数的遥感器。

在遥感实际应用中,大气辐射传输模型常需要被简化,如假设大气是水平均匀的、假设地面为朗伯面(完全漫反射)、排除云的存在、运用各种条件下的标准大气模式及大气气溶胶模式(由长期实验数据积累和理论研究归纳而成)等。一旦模式确定,将大气参数(大气模型、气溶胶模型)输入到大气辐射传输方程中,便可计算一些重要的大气校正参数(如大气透过率、大气程辐射等),再通过计算每个像元的反射值,以完成对整幅图像的大气校正。

目前国内外学者已发展了多种不同类型的大气辐射传输模型,如 RADFIELD 模型 MODTRAN 模型系列、6S 模型系列等。下面通过对应用最广的 6S、MODTRAN 大气辐射传输模型的简单介绍来说明大气校正的具体过程。

6S 大气校正模型^[14]适用于可见光—短波红外(波长 0.25~4 μm)范畴。它对不同情况下(不同遥感器、不同地面状况)太阳光在太阳—地面目标—遥感器整个传输路径中所受到的大气影响进行了描述,考虑了地气之间的多次散射和地面二向反射特性,能够将大气层顶的光谱反射率直接转换为地表反射率。在基于地面 BRDF(二向性反射率分布函数,详见本章“电磁波与地表的相互作用”的“方向反射”一节)的大气校正算法中,大气层顶部的可见光与近红外波段反射率可表示为:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{toa}} = & \rho_0 + T_s \left\{ e^{-\tau/\mu_v} e^{-\tau/\mu_s} \rho_s \right. \\ & + e^{-\tau/\mu_v} t_d(\mu_s) \bar{\rho} + e^{-\tau/\mu_v} t_d(\mu_v) \bar{\rho}' + t_d(\mu_s) t_d(\mu_v) \bar{\bar{\rho}} \\ & \left. + \frac{[e^{-\tau/\mu_s} + t_d(\mu_s)][e^{-\tau/\mu_v} + t_d(\mu_v)]S(\bar{\rho})^2}{1 - S\bar{\rho}} \right\} \end{aligned} \quad (1.33)$$

式中: ρ_{toa} 为遥感器在大气层顶部观测到的反射率; ρ_0 为大气程辐射反射率; ρ_s 为地面目标反射率; S 为大气底层向下的半球反射率; μ_s 为太阳天顶角的余弦值; μ_v 为卫星天顶角的余弦值; $e^{-\tau/\mu_s}$ 和 $t_d(\mu_s)$ 分别为太阳直射光和大气漫射光到达地面的大气透过率; $e^{-\tau/\mu_v}$ 和 $t_d(\mu_v)$ 分别为观测方向地面反射直达遥感器和经大气漫射光到达遥感器的大气透过率; τ 为大气光学厚度; $\bar{\rho}$ 、 $\bar{\rho}'$ 、 $\bar{\bar{\rho}}$ 分别为大气散射到地面的半球反射率、经地面散射到大气的地面半球反射率和经大气与地面两次散射后的地面半球反射率,它们依赖于大气光学参数和地表反射特性; T_s 为大气中 O_3 、 H_2O 等气体对可见光、近红外波段的吸收率。

从式(1.33)可见,要求解地面反射率 ρ_s ,必须要得到一系列中间计算结果。其中地面目标对遥感器在大气层顶部(TOA)接受到信号的贡献可分解为以下 4 个部分(图 1.11)。

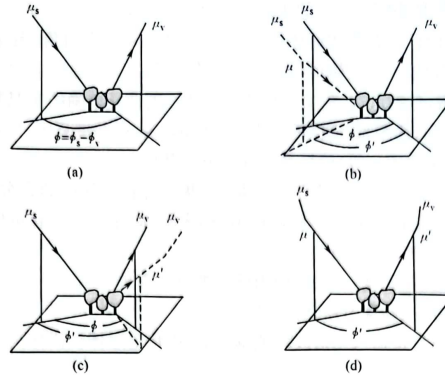


图 1.11 地-气相互作用示意图^[15]

- (1) 光线直接入射到地面并经地面直接反射到遥感器的部分 $e^{-\tau/\mu_s} \rho_s e^{-\tau/\mu_v}$ 。
- (2) 光线经大气散射到达地面并经地面直接反射到遥感器的部分 $t_d(\mu_s) \bar{\rho} e^{-\tau/\mu_v}$ 。
- (3) 光线直接入射到地面并经地面反射和大气散射到遥感器的部分 $e^{-\tau/\mu_v} \bar{\rho}' t_d(\mu_v)$ 。
- (4) 光线经大气散射到地面, 并经地面反射和大气散射到遥感器的部分, 以及地面与大气经多次相互散射到达遥感器的部分, 即

$$t_d(\mu_s) t_d(\mu_v) \bar{\rho} + \frac{[e^{-\tau/\mu_s} + t_d(\mu_s)][e^{-\tau/\mu_v} + t_d(\mu_v)] S(\bar{\rho})^2}{1 - S\bar{\rho}}$$

这 4 个不同的辐射传输过程, 能较好地解决大气-地面的耦合效应。4 部分之和表示了地面目标对遥感器信号的总贡献。式(1.33)中, $e^{-\tau/\mu_s}$ 、 $t_d(\mu_s)$ 、 $e^{-\tau/\mu_v}$ 、 $t_d(\mu_v)$ 、 S 这 5 个参数只与大气条件有关, 而与具体的每个像元无关; $\bar{\rho}$ 、 $\bar{\rho}'$ 、 $\bar{\rho}''$ 则与具体的像元有关, 对于每个像元都有对应的这 3 个值需要记录, 它们在 6S 软件中由输入的 BRDF 值计算出来; 另两个参数 T_s 、 ρ_0 也与像元无关, 而只与大气条件有关。获得以上这些参数就可求得 ρ_s 。

考虑到土地覆盖类型的变化, 胡宝新等^[16]为了提高实际观测值的权重, 将式(1.33)改为

$$\begin{aligned} \rho_{\text{toa}} = & \rho_0 + T_s \left\{ e^{-\tau/\mu_v} e^{-\tau/\mu_s} \rho_s \right. \\ & + \rho_s \left[e^{-\tau/\mu_v} t_d(\mu_s) \bar{\rho}^* + e^{-\tau/\mu_v} t_d(\mu_v) \bar{\rho}'^* + t_d(\mu_s) t_d(\mu_v) \bar{\rho}''^* \right. \\ & \left. \left. + \rho_s \frac{(e^{-\tau/\mu_s} + t_d(\mu_s))(e^{-\tau/\mu_v} + t_d(\mu_v)) S(\bar{\rho}^*)^2}{1 - S\bar{\rho}^*} \right] \right\} \end{aligned} \quad (1.34)$$

式中: $\bar{\rho}^* = \frac{\bar{\rho}}{\rho_s^m}$, $\bar{\rho}'^* = \frac{\bar{\rho}'}{\rho_s^m}$, $\bar{\rho}''^* = \frac{\bar{\rho}''}{\rho_s^m}$ 。

在此, ρ_s^m 是一个预测的地面反射率值, 由上一步反演的 BRDF 模型推算求得。式(1.34)是一个一元二次方程, 在得到式(1.33)中的参数与 ρ_s^m 后, 则可解出 ρ_s 值。当地面假定为朗伯体时, $\bar{\rho}^* = \bar{\rho}'^* = \bar{\rho}''^* = 1$, $\bar{\rho} = \rho_s$, 方程(1.34)可改为

$$\rho_{\text{toa}} = \rho_0 + T_s \left[\rho_s \frac{(e^{-\tau/\mu_s} + t_d(\mu_s))(e^{-\tau/\mu_v} + t_d(\mu_v))}{1 - S\rho_s} \right] \quad (1.35)$$

式(1.35)中的 ρ_s 在 6S 软件中可以通过基于朗伯体地面的大气校正反演模式来获得。

在 6S 大气校正软件中需要输入的主要参数有以下几个。

- 几何参数(用以计算太阳和遥感器的位置),包括太阳天顶角、卫星天顶角、太阳方位角、卫星方位角,也可以输入卫星轨道与时间参数来替代。
- 大气组分参数,包括水汽、灰尘颗粒度等参数。若缺乏精确的实况数据,可以根据卫星数据的地理位置和时间,选用 6S 提供的标准模型(如热带、中纬度夏天、中纬度冬天、副热带夏天、副热带冬天、美国标准模型等)的标准大气组分来替代。
- 气溶胶组分参数,包括水分含量以及烟尘、灰尘等在空气中的百分比等参数。若缺乏精确的实况数据,可以选用 6S 提供的标准模型(如大陆、海洋、城市、有机体燃烧、同温层等模式)的标准大气的气溶胶组分来替代。
- 气溶胶的大气路径长度,一般可用当地的能见度参数表示。
- 被观测目标的海拔高度及遥感器高度。
- 光谱条件,可以直接输入光谱波段范围,也可以将遥感器波段作为输入条件。
- 其他参数。

若是基于朗伯体大气校正,则采用式(1.35)直接输入像元的光谱值得到经过朗伯体大气校正后的地面反射率;若是基于 BRDF 大气校正,在选择了二向性反射模型(如 Ambrel's, Rahman 模型等)后,则需要输入像元所对应的模型参数值,并将反演的模型参数与其他大气参数(地-气耦合因子、大气透射率、大气吸收率等)一起作为输入,通过 6S 大气校正模型软件经过迭代计算,最终得到基于 BRDF 的大气校正图像,推算出相应的方向反射率与反照率^[16,17]。

MODTRAN 大气辐射传输模型适用于可见光—热红外(波长 0.25~10 000 μm)范畴,考虑了几种典型地物的二向反射特性,采用的是正演方法,即已知地面信息来获得遥感器所接收到的辐射信息。在假设地表为朗伯体、大气为各向同性的条件下,大气层顶部(TOA)的光谱辐射亮度 $L(\mu_v)$ 可由式(1.36)表达^[18]为

$$L(\mu_v) = L_p(\mu_v) + \rho_s / (1 - \rho_s S) \mu_s F_0 \tau(\mu_s) \tau(\mu_v) \quad (1.36)$$

式中: $L_p(\mu_v)$ 为大气程辐射; ρ_s 为地表反射率; S 是大气层底向下的大气半球反射率; F_0 为大气层顶的辐射通量密度; $\tau(\mu)$ 为从地表到传感器或到太阳的大气透射率; μ_s 、 μ_v 分别为太阳天顶角和卫星天顶角的余弦,设 $F = \mu_s F_0 \tau(\mu_s) \tau(\mu_v)$ 。

MODTRAN 4 模型提供了光谱透射比、热辐射率、光谱辐射亮度和光谱辐射照度四类光谱模式,“热带”、“中纬度夏天”、“中纬度冬天”、“标准大气模式”等 7 种不同大气组分模式,水平、垂直、倾斜 3 种大气光学路径,其他输入参数与 6S 软件相仿。模型考虑了地面二向反射特性,引入多种 BRDF 模型,使地表特征的参数化输入成为可能,提高了计算精度。

MODTRAN 大气校正基本步骤^[19]: ①选用光谱辐射亮度模式,输入三个地表反射率值 ρ_s 及一系列相关参量,运行 MODTRAN 程序后,得到某一特定大气条件下的三个相应的大气层顶(TOA)光谱辐射亮度值 $L(\mu_v)$; ②将三组 ρ_s 、 $L(\mu_v)$ 代入大气传输方程[式(1.36)],可以得到一组 L_p 、 S 、 F 值; ③对短波而言,假设大气条件的变化主要依赖于气溶胶光学厚度(能见度 V_0)的变化,则调整能见度,以确定多组 L_p 、 S 、 F 值,建立相应的查找表(LUT);并查找与地表值对应像元最为接近的大气层顶光谱辐射亮度值及其所对应的一组 L_p 、 S 、 F 值(即某一特定大气条件下); ④根据选取的大气传输方程和某一具体大气条件,代入式: $\rho_s = (L - L_p) / [F + (L - L_p) \times S]$,求解相关的大气参数(如 τ 、 L_p 等);最终完成整幅图像的大气校正。

6S、MODTRAN 大气辐射传输模型在描述非均一地表的空分布特性、方向反射特性、

邻近效应对大气的影响方面尚显不足。由于大气、地表之间的多次散射(即交叉辐射),使邻近像元的辐射混入目标像元。因此特别是对于高空间分辨率的图像,不均匀地表的邻近效应往往是不可回避的,一般通过求大气点扩散函数来消除^[20]。

1.2.3 电磁波与地表的相互作用

电磁辐射能与地表的相互作用,主要有三种基本的物理过程——反射、吸收、透射。

图 1.12 以水体表面为例来说明这个基本过程。依据能量守恒原理,我们可将三者关系描述为:

$$E_i(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda) \quad (1.37)$$

式中: E_i 为入射能; E_R 为反射能; E_A 为吸收能; E_T 为透射能。它们均是波长的函数。这里能量反射、吸收、透射的比例及每个过程的性质对于不同的地表特征是变化的。这种变化既依赖于地表特征的性质与状态,如物质组成、几何特征、光照角度等,又依赖于波长。因此可以通过不同波谱段地物间的差异来识别地物。

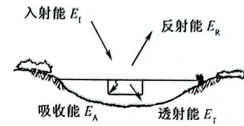


图 1.12 电磁辐射与地表的相互作用^[6]

1. 反射(Reflection)

当电磁辐射能到达两种不同介质的分界面时,入射能量的一部分或全部返回原介质的现象,称之为反射。反射的特征可以用反射率表示。反射率 ρ 为反射能与入射能之比。它是波长的函数,又称为光谱反射率 $\rho(\lambda)$,被定义为

$$\rho(\lambda) = \frac{E_R(\lambda)}{E_i(\lambda)} = \frac{\pi L(\lambda)}{E_i(\lambda)} \quad (1.38)$$

式中: $\rho(\lambda)$ 以百分数表示,其值为 $0 \sim 1$,为无量纲的量; $E(\lambda)$ 为到达介质表面的入射辐射照度; $L(\lambda)$ 为介质表面反射的辐射亮度。

影响物体光谱反射率的因素除了波长外,还包括物质类别、组成、结构、入射角、物体的电学性质(电导、介电、磁学性质)及其表面特征(粗糙质、质地)等。因此,对于遥感应用而言,物体的反射性质是揭示目标本质的最有用的信息。地物反射波谱特征的研究,对遥感是十分重要的。这将在第 2 章中作专门讨论。

任一表面的反射特性是由其表面几何形态——粗糙度支配的,而表面粗糙度是相对于入射能的波长而言的,也就是依据表面几何形态与入辐射波长的比例关系而定的。表面粗糙度是入射波长的函数,并与入射角关系密切。

关于表面粗糙度的瑞利判别准则是

$$h \leq \lambda / 8 \cos \theta \quad (1.39)$$

式中: h 为某一平面以上的高度度量,以波长计; λ 为波长; θ 为入射角。满足以上判别准则的表面为光滑表面;反之,为粗糙表面。这将在微波遥感中进一步加以讨论。

当电磁波到达两种不同介质的分界面时,除了有一部分入射能量被反射外,另一部分能量将偏离原入射方向而进入另一介质中的现象,称为折射。偏离的大小取决于电磁波在这两种介质中的传播速度之比及入射角。折射定律(斯涅耳定律)表征了入射角 θ_i 与折射角 θ_t 的关系(图 1.13),即

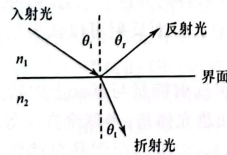


图 1.13 反射与折射的关系

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.40)$$

式中: n 为折射率。

物体对电磁波的反射可表现为三种形式,如图 1.14 所示。

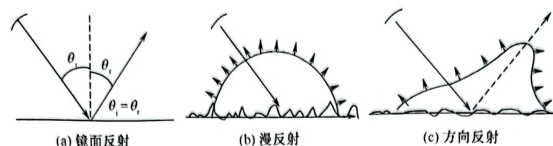


图 1.14 反射的三种形式

1) 镜面反射

当入射能量全部或几乎全部按相反方向反射,且反射角等于入射角,称为镜面反射(specular reflection)。镜面反射分量是相位相干的,且振幅变化小,并有极化(偏振)。假若表面相对于入射波长是光滑的($\lambda \gg$ 界面粗糙度),则出现镜面反射。对可见光而言,在镜面、光滑金属表面、平静水体表面均可发生镜面反射;而对微波而言,由于波长较长,故马路面也符合镜面反射规律。

2) 漫反射

当入射能量在所有方向均匀反射,即入射能量以入射点为中心,在整个半球空间内向四周各向同性的反射能量的现象,称为漫反射(diffuse reflection),又称朗伯(Lambert)反射或各向同性反射。漫反射相位和振幅的变化无规律,且无极化(偏振)。一个完全的漫射体称为朗伯体。若表面相对于入射波长是粗糙的,即当入射波长比地表高度小或比地表组成物质粒度小时,则表面发生漫反射。对可见光而言,土石路面、均一的草地表面均属漫射体。

漫反射面按朗伯余弦定律反射。朗伯余弦定律的表达式为

$$I(\theta) = I_0 \cdot \cos \theta \quad (1.41)$$

式中: θ 为观测方向与法线的夹角; $I(\theta)$ 为 θ 方向的辐射强度; I_0 为法线方向的辐射强度。也就是说,若辐射亮度 L (面辐射) 在 2π 空间上各向同性(朗伯反射),则辐射强度 I (点辐射) 在 2π 空间中的变化服从于朗伯余弦定律,即单位辐射面积发出的辐射能,落到空间不同单位立体角内的能量的数值不等,其值正比于该方向与辐射面法线方向夹角的余弦。

3) 方向反射

朗伯体表面实际上是一个理想化的表面。它被假定为介质是均匀的、各向同性的,并在遥感中多用以作为近似的自然表面。但事实上,自然界大多数地表既不完全粗糙的朗伯表面,也不完全是光滑的“镜面”,而是介于两者之间的非朗伯表面(非均一,各向异性)。其反射并非各向同性,而具有明显的方向性,即方向反射(directional reflection)。镜面反射可以认为是方向反射的一个特例。

方向反射率是指对入射和反射方向严格定义的反射率,即特定反射能量与其面上的特定入射能量之比。入射和反射方向的确定方法分别有微小立体角、任意立体角、半球全方向等3种。当入射、反射均为微小立体角时称为二向性反射(或双向反射)。二向性反射是自然界中物体表面反射的基本宏观现象。物体表面二向性反射现象的存在,使物体表面对太阳入射的

反射具有方向性,且这种方向性还随着太阳入射角及观测角度的变化而有明显的差异,特别是在热点方向(即观测方向与太阳入射方向一致时所对应的点)和入射方向的反方向的反射信号明显增强。这种差异不仅与两种角度有关,还随物体空间结构要素的变化而变化。

为了描述这种二向性反射现象,Nicodemus (1977) 给出了二向性反射率分布函数 BRDF (bidirectional reflectance distribution function) 这一描述表面反射特性空间分布的基本参数。它被定义为^[21]

$$\text{BRDF}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL(\Omega_r)}{dE(\Omega_i)} = \frac{dL(\theta_r, \phi_r)}{dE(\theta_i, \phi_i)} \quad (1.42)$$

式中: θ_i 表示入射辐射天顶角; ϕ_i 表示入射辐射方位角; θ_r 表示反射辐射天顶角; ϕ_r 表示反射辐射方位角; Ω_i, Ω_r 分别表示在入射和反射方向上的两个微小立体角; $dE(\Omega_i)$ 表示在一个微小面积元 dA 上,特定入射光 (θ_i, ϕ_i) 的辐照度(入射的辐射通量),单位为 W/m^2 ; $dL(\Omega_r)$ 表示在一个微小面积元 dA 上,特定反射光 (θ_r, ϕ_r) 的辐亮度(反射的辐射通量),单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。其中 BRDF 的单位为 $1/\text{sr}$ 。BRDF、 $dE(\Omega_i)$ 、 $dL(\Omega_r)$ 均为波长的函数。

BRDF 的物理意义是:来自入射 \vec{i} 方向(其天顶角为 θ_i , 方位角为 ϕ_i)地表辐照度的微增量与其所引起的观测 \vec{r} 方向(其天顶角为 θ_r , 方位角为 ϕ_r)上反射辐射亮度增量之间的比值^[20]。图 1.15 显示了二向性反射现象的图解以及各参量的含义。

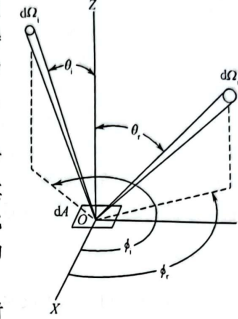


图 1.15 二向性反射(BRDF)图解^[22]

BRDF 也可表达为在给定方向上每单位立体角内的反射率(即双向反射率),即

$$\rho_{e,\lambda}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \text{BRDF} = \frac{L_\lambda(\theta_r, \phi_r)}{E_\lambda(\theta_i, \phi_i)} \text{sr}^{-1} \quad (1.43)$$

BRDF 是入射、反射两个方向的函数,而空间的每一方向需要两个变量(θ 和 ϕ)来表征。为了简洁表达“二向因子”,则以一个矢量形式表达 2π 立体角中某一 θ 天顶角、 ϕ 方位角所示方向,即 i 表示为入射方向 (θ_i, ϕ_i) 的矢量; r 表示为反射方向 (θ_r, ϕ_r) 的矢量。则 BRDF 模型可概念地表示为

$$\text{BRDF}(i, r, \lambda) = f[i, r, \rho(\lambda), s] \quad (1.44)$$

式中: λ 为波段(或波长); s 为描述空间结构的参数集合; $\rho(\lambda)$ 为组分材料波谱特征,它往往为遥感像元内几种材料波谱构成的矢量。

可见,BRDF 只取决于地物本身[波谱特征 $\rho(\lambda)$ 、空间结构 s]、两个方向的变量(i, r)以及入射辐射通量空间分布函数。BRDF 虽能较好地描述非朗伯体表面反射特性的空间变化特征,但很难测量。这是因为,BRDF 是两个方向—— $\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r$ 以及波长 λ 五个变量的函数,在 2π 空间中无论是入射还是反射均有无穷多个方向。严格地说,要完整地表达一个物体的非朗伯体特性需要有无穷多个测量数据,而这组无穷多个测量数据仅与一个具体对象相联系。例如,对某一棵树的 BRDF 测量结果一般不同于对另一棵树的测量结果^[20]。因而,往往采用另一种描写表面二向反射特性的物理量——二向反射率因子(BRF)来替代。它被定义为:在一定的辐照和观测条件下,目标的反射辐射通量 L_T 与处于同一辐照和观测条件的标准参考面(理想朗伯反射面)的反射辐射通量 L_p 之比。即

$$\text{BRF} = \frac{dL_T(\theta, \varphi, \lambda)}{dL_P(\theta, \varphi, \lambda)} \quad (1.45)$$

BRF 较易被测量,且在一定假定条件还可与 BRDF 联系。当 Ω_i 与 Ω_r 均趋于无穷小时,则在数值上 BRF 为 BRDF 的 π 倍,即

$$\text{BRF} = \frac{dL_T}{dL_P} = \frac{dL_T}{dE/\pi} = \pi(\text{BRDF}) \quad (1.46)$$

这为测定目标物的 BRDF 值提供了一条现实可行的通道。

既然, BRDF 包含有地物本身——波谱特征 $\rho(\lambda)$ 、空间结构 s 的信息。那么,人们可以通过 BRDF 模型(前向模型)以及参数反演模型(反向模型),从多角度遥感数据中,反演、分离、提取地表物理参数 $[\rho(\lambda)]$ 和空间结构参数 (s) ,如地表方向反射率、地表反照率、地表粗糙度、植被覆盖度以及植冠的叶面指数、叶面倾角分布等。此外,在给定入射光 (θ_i, ϕ_i) 和观测方向 (θ_r, ϕ_r) 的条件下,由于地物的空间结构信息对于不同波段的电磁波具有相同的特性,因而地物结构参数往往可以成为多波段遥感信息与多角度遥感信息之间相联系的纽带,是定量遥感必须研究的重要参数。

为了进一步研究二向性反射过程,国内外学者发展了一系列 BRDF 模型,并着重研究了植物冠层的 BRDF 模型。这些研究涉及多方面内容,是遥感前沿性的基础研究,许多问题还有待于深入探讨。在这里我们主要说明方向反射的概念及在多角度定量遥感研究中的重要性,进一步的论述请参看第 10 章“定量遥感”的有关内容。

4) 反照率

反射的特征也可表示为反照率(albedo),又称半球反射率,被定义为目标物向各个方向反射的全部辐射能量 M 与入射的总辐射能量 E 之比,常用 α 表示为

$$\alpha = M/E \quad (1.47)$$

地表反照率 α 指以太阳光作为入射光的地表半球反射率,它可以看做是地表反射各方向的积分。地表反照率是地表能量平衡中的一个重要参数,可以通过遥感所提供的辐射亮度值 L 或反射率 ρ 、二向反射率分布函数 BRDF 来反演获得。

在具体应用中,根据入射能的照射方式及反射能的测定方式,地表反射率(或反照率)又可进一步划分为:①方向-半球反射率(directional hemispherical reflectance, DHR),指以太阳直射光作为入射光的地表半球反射率,也称直入扇出反照率;在 MODIS 产品中被称为黑空(black-sky)反照率;②双半球反射率(bihemispherical reflectance, BHR)指以太阳直射光和天空散射光作为入射光的地表半球反射率,也称扇入扇出反照率;在 MODIS 产品中被称为白空(white-sky)反照率;③半球-方向反射率(hemispherical directional reflectance, HDR)指以太阳直射光和天空散射光作为入射光的地表方向反射率。

有了二向反射率分布函数 BRDF,对应一定光线入射方向,把观测方向的二向反射函数 BRDF 进行半球空间的积分,就得所谓的“直入扇出反照率”,即方向-半球反射率。天空晴朗无云时,直入扇出反照率可近似为地表的真实反照率。若把直入扇出反照率在光线入射方向进行半球空间积分,则得“扇入扇出反照率”,即双半球反照率。阴天或天空光均匀时,地表的反照率可近似用扇入扇出反照率来描述。“地表反照率的反演”参见第 14 章的有关内容。

2. 透射(Transmission)

当电磁波入射到两种介质的分界面时,部分入射能穿越两介质的分界面的现象,称为透

射。透射的能量穿越介质时,往往部分被介质吸收并转换成热能再发射。这将在第4章“热红外遥感”中加以讨论。

介质透射能量的能力,用透射率 τ 来表示。它被定义为透过物体的电磁波强度(透射能)与入射能量之比。对同一物体,透射率是波长的函数。

对于摄影遥感系统,胶片和滤光片的透射率是个十分关键的参数。自然界中,人们最熟悉的是水体的透射能力。这是因为人们可以直接观察到可见光谱段辐射能的透射现象。然而,可见光以外的透射,虽人眼看不见,但它是客观存在的,如植物叶子对可见光辐射是不透明的,但它能透射一定量的红外辐射。微波的透射能力强,它与地面的相互作用常表现为体散射,这将在第5章“微波遥感”中加以讨论。

参 考 文 献

- [1] Campbell J B. Introduction to Remote Sensing. New York: The Guilford Press, 1987.
- [2] 吕斯骅. 遥感物理基础. 北京: 商务印书馆, 1981.
- [3] 李小微, 等. 遥感原理与应用. 北京: 科学出版社, 2008.
- [4] 张仁华. 实验遥感模型及地面基础. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] Price J C. Quantitive aspects of remote sensing in the thermal infrared. In: Asrar G. Theory of Application of Optical Remote Sensing. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- [6] Lillesand T M, Kiefer R W. Remote Sensing and Image Interpretation (3rd). New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [7] 摄影测量学会. 遥感手册(第一分册). 汤定元, 陈宁锦, 等译. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [8] Hudson R D. Infrared System Engineering, New York: John Wiley & Sons, 1969.
- [9] Kaufman Y J, Wald A, Remer L A, et al. The MODIS 2.1 μ m channel—correlation with visiblere flectance for use in remote sensing of aerosol. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1997, 35: 1-13.
- [10] 遥感研究会. 遥感精解. 刘勇卫, 贺雪鸿译. 北京: 测绘出版社, 1993.
- [11] Zhao B L, Zhu Y G, et al. Meteorological satellite TIROS-N/TOVS remote sensing of atmospheric property and cloude. Advance in Atmospheric Science, 1993, 10(4): 387-392.
- [12] Liang S L, Fang H L, Chen M Z. Atmospheric correction of landsat ETM+ land surface imagery-part I: methods. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2001, 39 (11): 2490-2498.
- [13] Xue Y, Guo J P, Zhang X Y. Aerosol optical thickness retrieval over non-Lambertian land surface with synergistic use of AATSR radiance measurements and MODIS derived Albedo Model Parameters. Atmospheric Research, 2009, 93: 736-746.
- [14] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, et al. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1997, 35: 675-686.
- [15] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, et al. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6s) User Guide Version 01. NASA Goddard Space Flight Center-Code 923 Greenbelt MD 207711. 1994.
- [16] 胡宝新, Wanner W, 李小微, 等. 表面 BRDF 反射率大气校正的灵敏度分析. 遥感学报, 1997, 1(增刊): 191-196.
- [17] 龙飞, 赵英时. 多角度 NOAA 卫星数据地面 BRDF 反射率的大气校正. 遥感学报, 2002, 6(3): 173-178.
- [18] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN User's Manual, Version 4.1, 1999.
- [19] Liu Z H, Zhao Y S. Application of MODTRAN and 6S models to atmospheric correction of MODIS image data. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(suppl): 117-122.
- [20] 徐希孺. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [21] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, et al. Geometrical Consideration and Nomenclature for Reflectance, National Burea of Standards Report, 1977.
- [22] 李小微, 王锦地. 植被光学遥感模型与植被结构参数化. 北京: 科学出版社, 1995.