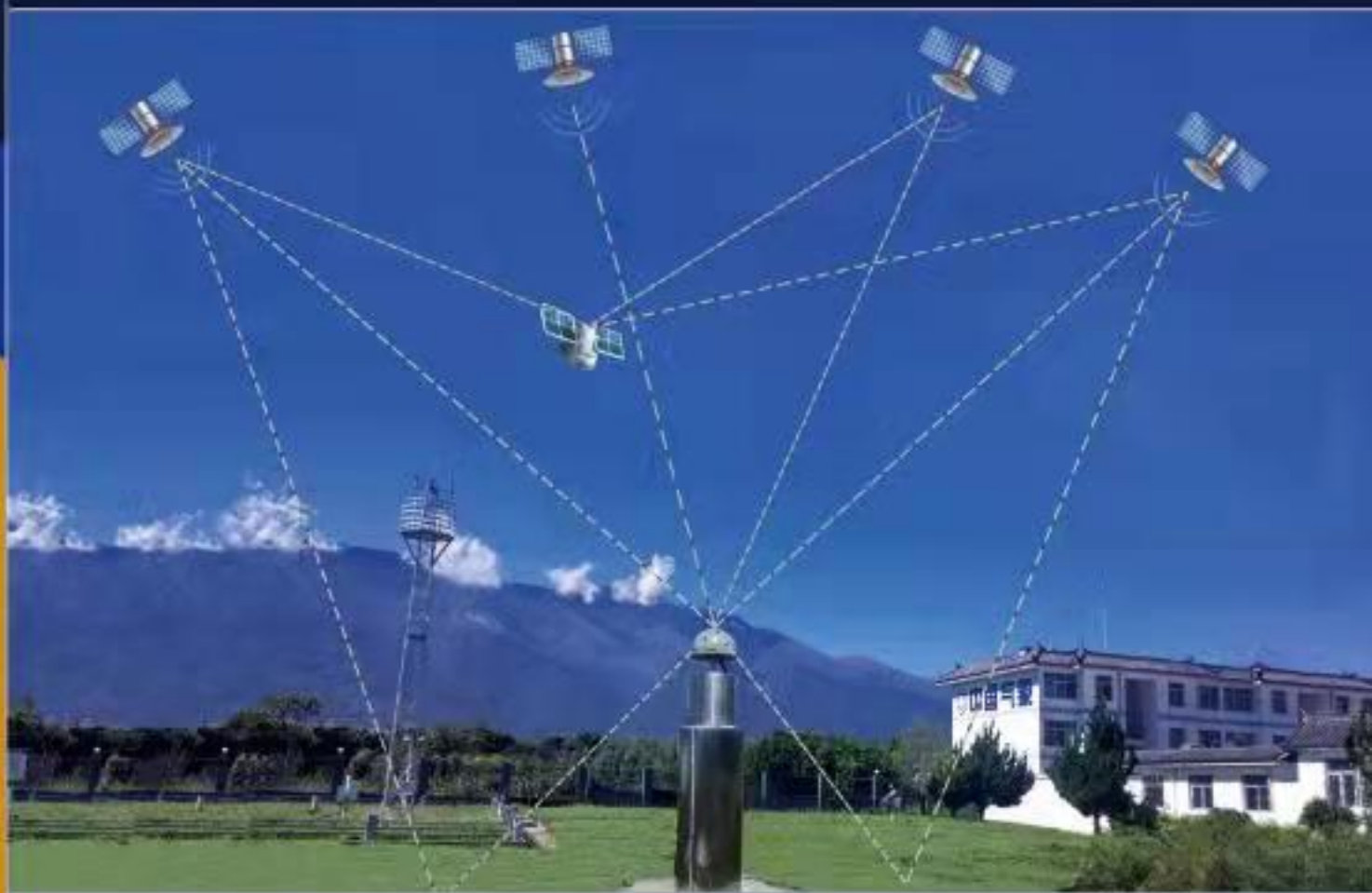




“十三五”江苏省高等学校重点教材（编号：2019-2-089）

# GNSS气象学 原理与应用

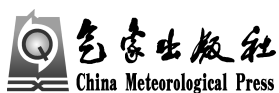
金双根 王新志 著



 气象出版社  
China Meteorological Press

# GNSS 气象学原理与应用

金双根 王新志 编著



## 内容简介

GNSS 气象观测技术在气象行业扮演着重要角色,具有重要应用前景。本书以 GNSS 技术与气象探测方法为基础,将 GNSS 基础理论、大气探测方法、反射测量方法和气象应用有机结合,内容涵盖地基 GNSS 气象探测、空基 GNSS 掩星、GNSS 反射测量等基本理论和方法,以及 GNSS 气象学应用与前沿发展。本教材基本概念详细、内容系统、应用新颖,在注重基础知识和基本理论的同时,结合气象业务化应用,更注重 GNSS 气象学技术实践、应用进展和发展前景。本教材通俗易懂,适应面宽,可作为高等学校测绘类、大气科学类及相关专业本科生和研究生的教材使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

GNSS 气象学原理与应用/金双根,王新志编著. —  
北京:气象出版社,2021. 2  
ISBN 978-7-5029-7334-6

I. ①G… II. ①金… ②王… III. ①卫星导航—全球  
定位系统—应用—气象学—研究 IV. ①P228. 4②P4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 234543 号

GNSS Qixiangxue Yuanli yu Yingyong

## GNSS 气象学原理与应用

金双根 王新志 编著

---

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码:100081

电 话:010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址:<http://www.qxcbs.com>

E-mail: [qxcbs@cma.gov.cn](mailto:qxcbs@cma.gov.cn)

责任编辑:王 迪

终 审:吴晓鹏

责任校对:张硕杰

责任技编:赵相宁

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:720 mm×960 mm 1/16

印 张:14.625

字 数:295 千字

彩 插:4

版 次:2021 年 2 月第 1 版

印 次:2021 年 2 月第 1 次印刷

定 价:60.00 元

---

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

# 前 言

随着全球卫星导航系统(GNSS)的发展,其研究范围及应用领域得到了极大的扩展,除定位、导航和授时(PNT)应用外,其中一个重要的应用领域就是 GNSS 气象学(GNSS/MET)。通过 GNSS 大气折射和反射测量,可以获得高精度、高时空分辨率的中性大气水汽、电离层电子含量、海面风场、海面高度、土壤湿度和冰雪融化等参数,弥补常规气象探测技术在空间和时间分辨率上的不足。GNSS/MET 是卫星导航、大地测量学、地球物理学和气象学交叉派生的新兴学科,对于提升气象预报精准度,提高 GNSS 导航定位精度等具有重要意义。

随着经济和社会的发展,人们对气象的关注程度越来越高。同时,气象对人们生活的影响越来越广,气象灾害对国家和人民造成的损失越来越大,这些都对气象工作提出了越来越高的要求。气象观测是气象工作的基础,因此需要借助各种现代化手段实现气象观测要素更全面、观测结果更准确、传输处理更及时、气象服务更智慧。2019 年 11 月,中国气象局发布《气象观测技术发展引领计划(2020—2035 年)》,进一步明确地基、机载和星载北斗 GNSS 掩星与反射测量等空天地一体化气象观测技术是气象现代化的重要组成部分。2020 年 7 月 31 日,我国北斗卫星导航系统开始向全世界提供连续稳定服务。

GNSS/MET 涉及精密大地测量学和气象学等交叉学科知识,常规高校由于缺乏足够的气象学知识支撑,其内容往往一笔带过,限制了 GNSS/MET 基础理论和应用的发展与普及。本教材将 GNSS 精密导航定位和气象探测的基础理论方法进行融合,其出版对于推动 GNSS/MET 基础理论快速普及与应用意义重大。

本书的主要特色与创新包含以下三个方面。

## 1. 以北斗卫星导航系统为核心,突出北斗 GNSS 气象学理论与应用

北斗卫星导航系统(以下简称北斗)是我国自行研制的全球卫星导航系统,随着北斗的建设,我国先后实施了“基于北斗导航卫星的大气海洋和空间监测预警应用示范工程”“北斗地基增强系统研制建设气象行业应用”等重大项目,推动了基于北斗的 GNSS/MET 理论与业务化应用的快速发展。本教材以北斗为核心,突出基于北斗的 GNSS 气象学理论与应用。

## 2. 紧跟气象部门业务化需求,理论结合实际应用

作为北斗气象行业应用的牵头单位,中国气象局先后建设完成了 GNSS/MET 国家平台、北斗高空气象探空系统、北斗海风海浪探测系统、北斗气象预警发布系统等 GNSS/MET 业务化运行平台,推动了北斗 GNSS/MET 由理论研究走向了业务化应用。本教材以中国气象局北斗 GNSS/MET 业务化应用为导向,理论结合实际应用。

## 3. 面向信息化气象探测发展趋势,知识内容新颖和全面

近年来,GNSS 掩星和反射测量已经由理论走向了实际应用。国内外发射多颗 GNSS 掩星和反射测量卫星,包括美国飓风 GNSS(CyGNSS)和中国风云 3C 气象卫星等,利用 GNSS 掩星和反射信号进行大气和海洋遥感,获取对流层大气温湿压、电离层电子密度和总电子含量,陆地土壤湿度,以及海面高度和风场等重要信息。本教材内容既包括地基 GNSS 大气探测、电离层遥感,还包括 GNSS 掩星、GNSS 反射信号测量等最新研究成果,知识体系更新颖,内容覆盖更全面。

本书由金双根、王新志共同撰写,共分 12 章。第 1 章、第 3 章、第 6 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章和第 11 章由金双根编写,第 2 章、第 4 章、第 5 章、第 7 章和第 12 章由王新志编写。最后,由金双根和王新志共同统稿。

本书的编写过程中,得到了江苏省高等教育学会和气象出版社的大力支持,中国气象局气象探测中心曹云昌研究员为本书提供了大量的素材,在此一并表示感谢。

限于作者的水平,书中如有错误和不当之处,敬请专家和读者批评指正。

作者

2020 年 8 月

# 目 录

## 前 言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 地球大气 .....	4
1.3 传统大气探测技术 .....	8
1.4 GNSS 气象学现状 .....	11
<b>第 2 章 GNSS 技术与方法</b> .....	15
2.1 GNSS 简介 .....	15
2.2 GNSS 信号组成 .....	21
2.3 GNSS 定位原理 .....	23
2.4 GNSS 主要误差源 .....	31
<b>第 3 章 地基 GNSS 气象学基础</b> .....	36
3.1 大气折射 .....	36
3.2 GNSS 大气延迟 .....	36
3.3 GNSS 电离层延迟 .....	41
3.4 GNSS 多路径延迟 .....	45
<b>第 4 章 地基 GNSS/MET 观测</b> .....	48
4.1 GNSS/MET 站网组成 .....	48
4.2 GNSS/MET 站网分类 .....	49
4.3 GNSS/MET 基准站 .....	49
4.4 GNSS/MET 业务运行 .....	59
4.5 GNSS/MET 数据处理 .....	62

<b>第 5 章</b>	<b>地基 GNSS 大气延迟估计</b>	64
5.1	GNSS 大气延迟	64
5.2	天顶总延迟解算方法	66
5.3	GAMIT 软件解算流程	68
5.4	斜路径延迟计算方法	72
5.5	三维水汽层析	76
<b>第 6 章</b>	<b>地基 GNSS 可降水量估计与应用</b>	80
6.1	干延迟	80
6.2	湿延迟	80
6.3	可降水量估计	81
6.4	三维 GNSS 水汽层析	82
6.5	地基 GNSS 气象学应用	88
<b>第 7 章</b>	<b>地基 GNSS 电离层探测</b>	92
7.1	电离层参数	92
7.2	地基 GNSS 估计 TEC	93
7.3	二维 GNSS 电离层估计	95
7.4	差分码偏差估计	99
7.5	三维电离层层析	101
<b>第 8 章</b>	<b>GNSS 无线电掩星原理</b>	106
8.1	GNSS 无线电掩星简介	106
8.2	GNSS 无线电掩星原理	111
8.3	GNSS 掩星误差	112
<b>第 9 章</b>	<b>GNSS 无线电掩星中性大气估计</b>	120
9.1	掩星数据预处理	120
9.2	掩星大气参数反演	121
9.3	中性大气参数精度评估	127
9.4	无线电掩星大气遥感应用	130
<b>第 10 章</b>	<b>GNSS 无线电掩星电离层探测</b>	137
10.1	GNSS 掩星反演电离层原理	137

10.2	电离层掩星产品 .....	141
10.3	等离子电子含量 .....	142
10.4	误差影响与分析 .....	146
10.5	电离层监测应用 .....	149
<b>第 11 章</b>	<b>GNSS 反射测量与气象应用 .....</b>	<b>152</b>
11.1	GNSS 反射测量 .....	152
11.2	GNSS 多路径估计 .....	155
11.3	GNSS-R 观测模式 .....	160
11.4	地表参数估计 .....	162
11.5	GNSS-R 气象应用 .....	164
<b>第 12 章</b>	<b>GNSS/MET 业务化应用 .....</b>	<b>171</b>
12.1	GNSS/MET 发展概况 .....	171
12.2	GNSS/MET 技术应用 .....	176
12.3	北斗 GNSS/MET 发展与应用 .....	179
12.4	风云 GNSS 掩星应用 .....	184
12.5	其他 GNSS/MET 应用 .....	185
12.6	GNSS/MET 未来发展 .....	192
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>195</b>
<b>附录 A</b>	<b>GNSS 接收机数据格式说明 .....</b>	<b>208</b>



