



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

北斗实时高精度定位服务系统研究

姓 名： 张益泽

学 号： 1310097

所在院系： 测绘与地理信息学院

学科门类： 工 学

学科专业： 测绘科学与技术

指导教师： 吴 斌 研究员

副指导教师： 陈俊平 研究员

二〇一七年五月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Doctor of Philosophy

Research on Real-Time High Precision BeiDou Positioning Service System

Candidate: Zhang Yize
Student Number: 1310097
School/Department: College of Surveying and
Geo-Informatics
Discipline: Engineering
Major: Surveying and Mapping
Supervisor: Prof. Wu Bin
Vice Supervisor: Prof. Chen Junping

May, 2017

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

随着我国北斗卫星导航系统的发展,北斗系统已经成为国际四大全球 GNSS 系统之一。与 GPS 等系统相比,北斗在定位性能上还存在一定差距。为了提高北斗的服务性能,我国建立了自己的北斗广域增强系统。

本文在 GNSS 精密定位理论的基础上,对 GNSS 精密定位的性能展开了研究,进而对北斗实时增强精密定位服务系统中的相关方面进行了分析。

本文的研究内容和研究成果主要包括以下几方面:

(1) 介绍了 GNSS 定位中的时间系统、坐标系统,以及各 GNSS 系统所采用的坐标参考框架;对 QZSS 和 IRNSS 的时空系统及最新的 ITRF2014 框架进行了介绍;介绍了 GNSS 观测模型及几种常见的线性组合;详细介绍了 GNSS 精密定位相关的误差理论;介绍了 GNSS 定位中数据预处理的方法,并对其参数估计方法进行了介绍,论证了最小二乘和 Kalman 滤波的等价性。

(2) 基于 Net_PPP 软件,利用全球分布的 MGEX 数据,对 GNSS 精密单点定位性能进行了分析。研究表明,本文的结果与目前国际上传统 PPP 的定位精度相当。同时分析了影响 PPP 收敛时间的因素,包括钟差采样率、数据采样率、DOP 变化及参数相关性、伪距噪声及接收机类型、对流层先验信息约束、多系统组合等因素。对影响 PPP 收敛后的精度的因素进行了分析,认为多系统组合和卫星钟差采样率的提高能提高 PPP 收敛后的定位精度。

(3) 为分析影响精密定位的卫星轨道和钟差误差,介绍了 GNSS 广播星历空间信号精度评定的方法,对 2015~2016 年共两年的 GPS、GLONASS、Galileo 和 2014 年~2016 年共近三年的 BDS 广播星历空间信号精度进行了评定。认为目前 GPS 和 Galileo 广播星历空间信号精度最高,分别能达到 0.6m 以内和 0.5m 以内。GLONASS 受其钟差性能的影响,广播星历钟差精度约为 2.13m, BDS 的 GEO、IGSO、MEO 卫星广播星历空间信号精度统计结果分别约 2.05m、1.14m、1.53m。并认为 GLONASS、Galileo 的 E24 及 BDS 卫星的广播星历存在系统性偏差。以 BDS 为例,对其广播星历偏差进行了分析,利用全球分布的 18 个 MGEX 站和北斗广播星历增强信息计算了共 97 天的伪距定位残差,得到了各个频点上的广播星历偏差,该偏差变化较为稳定。分析结果比较该偏差与广播星历的 TGD 和 IGS 的 DCB 的差异的相关性高达 88%,推测可能是北斗系统监测站接收机与普通接收机的卫星通道时延标定不一致造成的。将该偏差改正到 TGD 上,用户定位精度在 N、E、U 方向上分别提高 14.9%、28.4%、15.5%。

(4) 为提高北斗广域增强系统中的空间信号精度,介绍了北斗广域增强信息中的等效钟差的计算原理。利用全国分布的实测数据对等效钟差性能和定位效果进行了分析。认为等效钟差中除了包含卫星钟差预报误差,还有效地补充了区域网定轨中未能与钟差完全分离的轨道误差,经等效钟差改正后的用户距离误差由 0.91m 降至 0.26m,用户平均定位精度可由 3.11m 提高至 1.22m。在此基础上对影响等效钟差的相关因素进行了分析。在区域监测网范围内,只要测站选择合理,增加测站数目并不会提高等效钟差精度;等效钟差与卫星频率无关,但不同频率上的 TGD/DCB 精度会导致等效钟差存在系统性偏差;在区域监测网范围内,轨道误差会被等效钟差吸收,对用户定位的影响不大;等效钟差可用于用户精密定位中,只要权重选择合理,精密定位精度优于伪距定位精度,可达亚米级。

(5) 针对北斗星基增强系统分米级服务的要求, 实现用户定位精度的进一步提升, 提出了一种适合用户基于相位观测值定位的分区综合改正模型。该模型计算参考站的伪距/相位观测值综合改正数, 并将综合改正数作为新增的星基增强参数, 并采用分区的方式编排到北斗广播电文进行播发。在用户端, 用户接收其所在分区的综合改正数用于改正其伪距/相位观测值, 即可实现基于 PPP 模式的分米级定位。在该理论基础上, 分析了参数更新频度和时延对分区综合改正数的影响, 认为更新频度小于 2 分钟对用户定位精度影响不大。用户定位结果表明, 基于分区改正定位能实现分区中心 600km 范围内双频动态定位精度平面小于 0.15m, 高程小于 0.20m。单频用户动态定位精度平面小于 0.30m, 高程小于 0.46m。动态定位双频用户在 30min 内三维误差可收敛至 0.5m, 单频用户在 30min 内三维误差可收敛至 0.7m。随着用户站距离分区中心越远, 定位效果总体呈现变差的趋势。总体上, 当用户在分区中心 1000km 范围内时, 分区改正数都能实现分米级定位服务。对于 IGS 站或普通用户接收机, 北斗广播星历偏差改正能提高分区改正双频定位精度和收敛时间。

(6) 为了获取高采样率卫星钟差, 介绍了基于历元间差分的高效精密卫星钟差加密方法。利用 MGEX 观测数据对 GPS/BDS 精密卫星钟差加密进行了试算, 将 5min 卫星钟差加密到 30s。其加密钟差精度在 10ps 以内, 且适当减少观测站个数对加密钟差的精度影响很小。Allan 方差与原始 5min 的卫星钟差保持一致, 不同历元的钟差对用户动态定位的影响在毫米级。采用加密后的卫星钟差, 较原始钟差可以提高 PPP 的收敛时间和动态 PPP 的定位精度

最后, 对本文的进一步工作方向进行了简要讨论。

关键词: 精密单点定位, 广播星历偏差, 等效钟差, 分区改正数, 卫星钟差加密

ABSTRACT

With the development of BeiDou Navigation Satellite System(BDS), BDS has become one of the four Global Navigation Satellite System (GNSS). However, the positioning performance of BDS is not as well as systems such as GPS. To improve the precision of positioning service of BDS, China has set up the wide area augmentation system for BDS.

In this thesis, based on the theory of GNSS precise positioning, the performance of GNSS precise point positioning is investigated and then some aspects of providing real-time precise positioning service of BDS is researched.

The main parts and results of this thesis include:

(1) First we introduce the time and coordinate system in GNSS, together with the reference frames for each GNSS system. The time and coordinate system for QZSS and IRNSS are also discussed. The newest reference frame ITRF2014 is introduced briefly. After that, the observation model and linear combination of GNSS is introduced, then the model for every part of the error is introduced in detail. The data pre-processing in GNSS is discussed and the parameter estimation method is introduced. The equivalency of least square and kalman filter is proved.

(2) Based on the self-developed software Net_PPP, we analysis the PPP result of 49 world-wide distributed MGEX stations. Results show that the precision of Net_PPP is at the same level of current international result. The factors that affect PPP convergence period is discussed in this thesis. Satellites clock sampling, data sampling, DOP change and parameter correlation, pseudo-range noise and receiver type, a priori constraint of troposphere, multi-GNSS combination are the main factors that concerns. Multi-system combination and satellite clock sampling also affect the PPP precision after convergence.

(3) To further evaluate the precision of satellite orbit and clock, the strategy to assess the SISURE for GNSS broadcast ephemeris is discussed in this thesis. Then the SISURE of GPS, GLONASS and Galileo broadcast ephemeris from 2015-2016 and BDS broadcast ephemeris from 2014-2016 are assessed in detail. Results show that GPS and Galileo have the best broadcast ephemeris precision, which can reach to below 0.6m and 0.5m. As for GLONASS, the SISURE is 2.13m due to the worse clock stability. The SISURE for BDS is 2.05m, 1.14m and 1.53m for GEO, IGSO and

MEO respectively. A phenomenon of constant broadcast bias is found among GLONASS, E24 of Galileo and BDS. To have a specific observation of the broadcast bias of BDS, 97 days of 18 MGEX stations are taken for the computing of pseudo-range residuals. The BDS Broadcast Ephemeris Bias (BEB) are quite stable at each frequency. The correlation of BEB and difference of TGD from broadcast ephemeris and DCB from IGS products is as high as 88%, which indicates that the BEB may come from the difference delay of the BDS monitoring stations and IGS stations. After correcting the BEB into TGD, the dual-frequency user positioning can improve 14.9%, 28.4% and 15.5% in N, E, U direction.

(4) The strategy in computing the Equivalent Satellite Clock(ESC) for BDS is introduced. By using a national distributed network, the performance of ESC and its effect on positioning is evaluated, which proves that the ESC contains not only the error of satellite clock, but also the orbital error that absorbed by satellite clock. After correcting the ESC, the user range error decrease from 0.91m to 0.26m. As for the positioning error, it improves from 3.11m to 1.22m. We also analyzed the factors that affect ESC. If the station distribution is reasonable, adding stations would not significantly increase the precision of ESC under regional monitoring network. ESC has no relationship with frequency, but a systematic bias would appear for a specific satellite due to the error of TGD/DCB from satellite or receiver. The orbital error has not much influence on ESC precision under a regional network. Results demonstrate that ESC can also be used in PPP, which would greatly improve the positioning precision to a sub-meter level, as long as a proper weight consideration.

(5) To meet the requirement of sub-meter level positioning service of BDS SBBAS, a new concept of zone correction is proposed in this thesis. The zone correction divided China into several zones and comprehensive corrections are computed based on pseudo-range and carrier phase on reference stations. By broadcasting it to users through GEO satellite, both dual- and single-frequency users can conduct a carrier phased based PPP. Results show that the precision does not lose much when the parameter update frequency is less than 2 minutes. After applying zone correction, the mean kinematic precision is below 0.15m in horizontal and 0.20m in vertical for dual-frequency user at a mean distance of 600km off the zone center. As for single frequency user, the mean kinematic positioning precision is below 0.30m in horizontal and 0.46m in vertical, respectively. The zone-divided kinematic PPP can convergence to 0.5m in 30 minutes for dual-frequency user and to 0.7m in 30 minutes

for single frequency user. The farther away from the zone center, the worse of the zone-divided PPP result. In general, the user can achieve a positioning precision better than 1m within the distance of 1000km from zone center. As for IGS stations, BEB can improve the convergence period of zone-divided PPP.

(6) For the requirement of precise satellite clock in precise positioning, an efficient epoch-difference based algorithm of satellite clock densification of high sampling is introduced in the thesis. GNSS data of the IGS MGEX tracking network and the GPS/BDS satellite clocks of 30 seconds sampling are used for the algorithm evaluation. Comparing the densified 30-s GPS/BDS satellite clocks we conclude that the precision of densified satellite clock is below 10ps and the number of stations has neglectable impacts on the precision of the densified clocks. The Allan Deviation of 30-s clocks is consistence with that of 5-min, which indicates that the densified 30-s clock keeps clocks' physical characters. Kinematic PPP with shifted epochs demonstrates that the densified clock doesn't lose accuracy. Static/kinematic PPP using densified 30-s and original 5-min clocks shows that PPP convergence time is reduced and positioning accuracy is greatly improved using the densified clocks.

Finally, the future work of this thesis is discussed.

Key Words: Precise Point Positioning, Broadcast Ephemeris Bias, Equivalent Satellite Clock, Zone Correction, Satellite Clock Densification

目录

摘要	I
ABSTRACT	III
目录	VI
符号说明	X
第 1 章 引言	1
1.1 GNSS 导航系统概述.....	1
1.1.1 GPS.....	1
1.1.2 GLONASS.....	1
1.1.3 Galileo.....	2
1.1.4 BDS.....	3
1.1.5 其他区域卫星导航系统.....	4
1.2 国内外高精度定位服务系统现状.....	5
1.2.1 广域差分增强系统.....	6
1.2.2 商业星基增强系统及实时精密定位服务.....	7
1.3 研究目的及选题意义.....	12
1.4 本文研究内容.....	12
第 2 章 GNSS 精密定位基础理论.....	14
2.1 时空系统.....	14
2.1.1 时间系统.....	14
2.1.2 坐标系统.....	18
2.1.3 参考框架.....	20
2.2 GNSS 观测模型及线性组合.....	22
2.2.1 GNSS 观测模型.....	22
2.2.2 观测值线性组合.....	24
2.3 定位模型误差及改正.....	28
2.3.1 几何距离和钟差改正.....	29
2.3.2 相对论改正.....	32
2.3.3 TGD/DCB 改正.....	34
2.3.4 电离层改正.....	37
2.3.5 对流层改正.....	39
2.3.6 PCO/PCV 改正.....	40
2.3.7 相位缠绕改正.....	43
2.3.8 地球形变改正.....	44
2.4 数据预处理.....	46

2.4.1 实时周跳探测.....	46
2.4.2 实时相位平滑伪距.....	48
2.5 GNSS 定位模型参数估计.....	52
2.5.1 定位函数模型及随机模型.....	52
2.5.2 最小二乘.....	55
2.5.3 Kalman 滤波.....	56
2.6 本章小结.....	59
第3章 GNSS 精密单点定位性能评估及分析.....	60
3.1 Net_PPP 及处理策略.....	60
3.1.1 Net_PPP.....	61
3.1.2 数据及产品介绍.....	61
3.2 PPP 定位性能评价.....	65
3.2.1 静态 PPP.....	65
3.2.2 动态 PPP.....	68
3.3 收敛性分析.....	69
3.3.1 钟差采样率.....	70
3.3.2 数据采样率.....	71
3.3.3 DOP 变化及参数相关性.....	72
3.3.4 伪距噪声及接收机类型.....	73
3.3.5 对流层先验信息约束.....	77
3.3.6 多系统组合.....	77
3.4 PPP 定位性能提升分析.....	79
3.4.1 多系统对 PPP 性能的影响.....	80
3.4.2 钟差采样率对 PPP 性能的影响.....	81
3.5 本章小结.....	82
第4章 北斗广播星历偏差分析.....	83
4.1 广播星历误差.....	83
4.2 GNSS 广播星历误差分析.....	86
4.2.1 GPS.....	86
4.2.2 GLONASS.....	88
4.2.3 GALILEO.....	90
4.2.4 BDS.....	92
4.3 北斗广播星历偏差分析.....	94
4.3.1 计算策略.....	94
4.3.2 北斗广播星历偏差计算.....	95
4.4 北斗广播星历偏差应用.....	96
4.5 本章小结.....	99
第5章 北斗广域差分等效钟差估计.....	101

5.1 等效钟差计算原理	101
5.2 等效钟差估计结果分析	102
5.2.1 等效钟差估计结果	103
5.2.2 测站数对等效钟差的影响	106
5.2.3 频率组合对等效钟差的影响	107
5.2.4 轨道精度对等效钟差的影响	108
5.2.5 等效钟差对精密定位的影响	109
5.3 本章小结	109
第 6 章 北斗分区综合改正数	111
6.1 分区综合改正数原理和计算策略	111
6.1.1 分区综合改正数原理	111
6.2.2 分区综合计算策略	114
6.2 分区综合改正数定位模型	116
6.2.1 双频定位模型	116
6.2.2 单频定位模型	117
6.3 分区综合改正数模型评估	117
6.3.1 分区设计	117
6.3.2 参数播发频度	118
6.4 分区综合改正数定位性能分析	120
6.4.1 总体定位性能	121
6.4.2 收敛性分析	122
6.4.3 与 gbu 定位性能比较	123
6.4.4 对流层参数影响	124
6.4.5 单频定位模型影响	125
6.4.6 分区改正数中国范围内定位效果	126
6.5 BEB 在分区改正定位中的应用	126
6.6 本章小结	128
第 7 章 GPS/BDS 精密卫星钟差加密	129
7.1 精密钟差获取方法	129
7.2 钟差加密算法	130
7.2.1 历元间钟差计算	130
7.2.2 高频精密钟差综合	131
7.3 GPS/BDS 卫星钟差加密实验及评估	132
7.3.1 相对钟差精度评估	133
7.3.2 Allan 方差	135
7.3.3 移动历元动态 PPP	136
7.4 精密钟差应用	137
7.5 本章小结	139

第 8 章 结论与展望	140
8.1 结论	140
8.2 进一步工作的方向	142
致谢	143
参考文献	145
附录 数据来源	154
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果	156

符号说明

ANTEX	ANTenna EXchange format
APC	Antenna Phase Centre
ARP	Antenna Reference Point
BEB	Broadcast Ephemeris Bias
BGD	Broadcast Group Delay
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
BDS	BeiDou Satellite Navigation System
CGCS2000	China Geodetic Coordinate System 2000
CNMC	Code Noise and Multipath Correction
CTRF	Conventional Terrestrial Reference Frame
CRS	Conventional Celestial Reference System
DCB	Differential Code Bias
DOP	Dilution Of Precision
DOY	Day Of Year
ECEF	Earth-Centred, Earth-Fixed
GEO	Geosynchronous Orbit
GF	Geometry-Free combination
GIM	Global Ionospheric Maps
GLONASS	GLObal NAVigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRAPHIC	Group and Phase Ionospheric Calibration
GTRF	Galileo Terrestrial Reference Frame
IAU	International Astronomical Union
ICD	Interface Control Document
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IF	Ionosphere-Free combination
iGMAS	international GNSS Monitoring And Assessment
IGS	International GNSS Service
IGSO	Inclined Geosynchronous Satellite Orbit
IONEX	IONosphere map EXchange format

ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ISC	Inter Signal Correction
JD	Julian Day
JGS	Japan satellite navigation Geodetic System
MC	Mass Center
MEO	Medium Earth Orbit
MHM	Multipath Hemisphere Map
MJD	Modified Julian Day
MPC	Mean Phase Center
MW	Melbourne-Wubben
NL	Narrow-Lane combination
NGS	National Geodetic Survey
NEU	North East Up
OMC	Observation Minus Correction
PCO	Phase Centre Offset
PCV	Phase Centre Variation
PHM	Passive Hydrogen Maser
POD	Precise Orbit Determination
PPP	Precise Point Positioning
PZ-90	Parametry Zemli 1990 (Parameters of Earth 1990)
SISURE	Signal In Space User Range Error
SLR	Satellite Laser Ranging
STEC	Slant Total Electron Content
TAI	International Atomic Time
TDB	Barycentric Dynamical Time
TDT	Terrestrial Dynamical Time
TECU	Total Electron Content Unit
TGD	Timing Group Delay
TRS	Conventional Terrestrial Reference System
TT	Terrestrial Time
TWTFT	Two-Way satellite Time and Frequency Transfer
UERE	User Equivalence Range Error, UERE
UDRE	User Differential Range Error
UTC	Coordinated Universal Time

VTEC	Vertical Total Electron Content
WGS-84	World Geodetic System 84
WL	Narrow-Lane combination
ZHD	Zenith Hydrostatic Delay
ZTD	Zenith Tropospheric Delay
ZWD	Zenith Wet Delay

第1章 引言

1.1 GNSS 导航系统概述

随着 GNSS(Global Navigation Satellite System)导航系统的发展,目前已经建成或正在建设的全球 GNSS 导航系统包括美国的 GPS(Global Positioning System)、俄罗斯的 GLONASS(GLObal Navigation Satellite System)、欧盟的 Galileo 及中国的北斗系统(BeiDou System, BDS)。另外,印度和日本也分别建立了其区域卫星导航系统 IRNSS(Indian Regional Navigation Satellite System) 和 QZSS(Quasi-Zenith Satellite System)。本节对这几大系统的概况及其最新发展进行简要介绍。

1.1.1 GPS

作为最早发展的全球卫星导航系统,GPS于 1993 年提出并在 1995 年投入全面运行。GPS计划由 24 颗均匀覆盖在距离地面高度约 20200km的中轨卫星(Media Earth Orbit, MEO)组成,其卫星轨道倾角为 55° ,运行周期为 11h58min2s。为了更全面覆盖全球区域,GPS实际卫星数超过 24 颗。目前GPS在轨运行的卫星有 31 颗,分布在 6 个轨道面上,以保证在地球上任何一个地方在正常情况下都能观测到至少 7 颗卫星¹。

GPS发展至今,一共经历了Block I、Block II、Block IIA、Block IIR、Block IIR-M、Block IIF等不同类型卫星。截至 2017 年 4 月,在轨运行的卫星中包含 12 颗Block IIR、7 颗Block IIR-M、12 颗Block IIF卫星。GPS Block IIR之前的卫星频率主要为L1 和L2,随着GPS的发展,Block IIR卫星增加了第二代信号L2C,Block IIF增加了第三代信号L5。新一代的Block III卫星也计划于 2018 年初发射²。GPS III将提供第四代信号L1C,并不再具备SA功能,其设计寿命也比上一代卫星更长。

GPS地面部分由 2 个主控站(其中一个为备用站),15 个全球分布的监测站及 11 个控制站组成。受其良好的监测站分布的影响,GPS广播星历轨道精度相对其他系统较高。另外,随着GPS卫星类型的更新,其上搭载的原子钟也越来越稳定,这也使得GPS广播星历卫星钟差预报误差越来越小。受这两者的影响,GPS广播星历空间信号精度越来越高。以 2016 年 5 月 11 日为例,GPS在全球的平均用户距离误差(User Range Error, URE)在 95%的时间内都优于 0.715m^3 ,如此高的空间信号精度使GPS平均定位误差在平面优于 1.9m、高程优于 3.9m(均为 95%)(WJHT Center, 2017)。

1.1.2 GLONASS

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System

² <http://gpsworld.com/2016-in-review-gps-navigates-the-future/>

³ <http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>

GLONASS由 24 颗分布在 3 个轨道面的MEO卫星组成，其轨道高度为 19100km，卫星倾角为 64.8° ，运行周期为 11h15min44s。GLONASS系统于 1976 年开始建设，但由于经费原因，其卫星数由 1996 年的 24 颗降至 2001 年的 6 颗。此后俄罗斯政府重启GLONASS建设，直至目前其在轨卫星数又恢复至 24 颗⁴。另外还有一颗为备用卫星，一颗处于测试状态，一颗卫星还在核实状态。

目前GLONASS主要由GLONASS-M和GLONASS-K1 两种类型卫星组成，其钟差误差为 5×10^{-14} 至 1×10^{-13} ，远低于GPS卫星，其下一代卫星计划为GLONASS-K2，届时钟差稳定性将提升一个量级⁵。根据最新研究结果，目前GLONASS的空间信号精度在 2.4m以内(Montenbruck, 2017)，相比 2011 年的 2.8m略有提高(Revnivykh, 2012)。

GLONASS地面控制部分由 1 个主控站、5 个跟踪站、2 个SLR(Satellite Laser Ranging)站及 10 个监测站组成，主要分布于前苏联地区。为了提高GLONASS空间信号精度，GLONASS除了发展下一代卫星外，也积极在巴西、南极等海外建设监测站，并预期在 2020 将空间信号精度提高至 0.6m以内⁶。

与GPS等其他系统采用码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)不同，GLONASS采用频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)的方式传输信号，即所有卫星在 15 个不同的频率上传输相同的码。L1 和 L2 的频率与频率号的关系为：

$$\begin{aligned} f_1 &= 1602\text{MHz} + n \cdot 0.5625\text{MHz} \\ f_2 &= 1246\text{MHz} + n \cdot 0.4375\text{MHz} \end{aligned}, n = -7, \dots, 5, 6 \quad (1.1)$$

需要注意的是，GLONASS各卫星上的频率号并不是固定不变的⁷，其广播星历中实时给出了GLONASS各卫星的频率号(GLONASS ICD, 2008)。

GLONASS也在研究在GLONASS-K1和后续发射的卫星上采用CDMA模式(Revnivykh, 2012)，但目前仍然没有正式的接口文件(Montenbruck, 2017)。

另外，与GPS等其他系统不同，GLONASS广播星历并不给出卫星的开普勒轨道参数及其摄动改正，而是直接给出了卫星在参考时刻的坐标、速度和加速度，用户在定位时需根据Runge-Kutta积分计算卫星位置。

1.1.3 Galileo

Galileo是由欧盟发起，并由ESA(European Space Agency)和GSA(European GNSS Agency)共同负责运作的导航系统。Galileo计划由 30 颗（其中 3 颗为备用卫星）分布在 3 个轨道高度为 23222km 的轨道面上的MEO卫星组成，其卫星轨道倾角为 56° ，轨道运行周期为 14h4min45s，这样保证在地球上任何一个地方都能观测到至少 6 颗高度角大于 10° 的卫星(Subirana, 2013)。Galileo系统的卫星频率信号分为E1、E6、E5、E5a、E5b五种(Galileo ICD, 2015)。

Galileo已于 2016 年 12 月 15 日开始宣布正式服务⁸，其发展计划主要分为四个步骤（见图 1.1）。其中第一颗卫星发射于 2005 年 12 月，至 2011 年之前，只

⁴ <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>

⁵ <https://en.wikipedia.org/wiki/GLONASS>

⁶ https://www.rbth.com/articles/2012/02/16/glonass_benefits_worth_the_extra_expense_14862.html

⁷ http://ionosphere.cn/glonass_frequency_channel

⁸ http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo_begins_serving_the_globe

有两颗试验卫星GIOVE-A和GIOVE-B（目前均已退役），其后在2011年和2012年先后发射了四颗在轨验证卫星(In-Orbit Validation, IOV)，2012年之后发射的卫星均为FOC(Full Operational Capability)卫星。截至2017年3月，正式提供服务的卫星一共有11颗（包括3颗IOV卫星和8颗FOC卫星），另外还有4颗卫星处于在轨测试阶段⁹。



图 1.1 Galileo 系统发展计划 (<https://www.gsc-europa.eu/>)

Galileo的卫星钟大部分采用氢原子钟¹⁰，其监测站分布于全球范围¹¹，这些因素使得Galileo的空间信号精度甚至优于GPS(Montenbruck, 2017)。

目前Galileo主要提供Open Access Navigation、Commercial Navation（授权用户）、Safety and Life Navigation、Public Regulated Navigation（授权用户）、Search and Rescue等五种服务¹²，其中最基本的Open Access Navigation服务精度能达到1m以内。

1.1.4 BDS

BDS 是中国自主发展的卫星导航系统，其空间星座计划为由 5 颗地球静止轨道（GEosynchronous Orbit, GEO）卫星、27 颗中圆地球轨道（MEO）卫星和 3 颗倾斜地球同步轨道（Inclined Geosynchronous Satellite Orbit, IGSO）卫星组成的全球卫星导航系统。GEO 卫星轨道高度为 35786km，分别定点于东经 58.75°、80°、110.5°、140° 和 160°；MEO 卫星轨道高度 21528km，轨道倾角 55°；IGSO 卫星轨道高度 35786 千米，轨道倾角 55° (BDS ICD, 2016)。图 1.2 显示了 2016 年 1 月 1 日这一天的北斗卫星星下点轨迹图。

⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Galileo_satellites

¹⁰ <https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information>

¹¹ <https://www.gsc-europa.eu/galileo-gsc-overview/system>

¹² [https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(satellite_navigation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_(satellite_navigation))

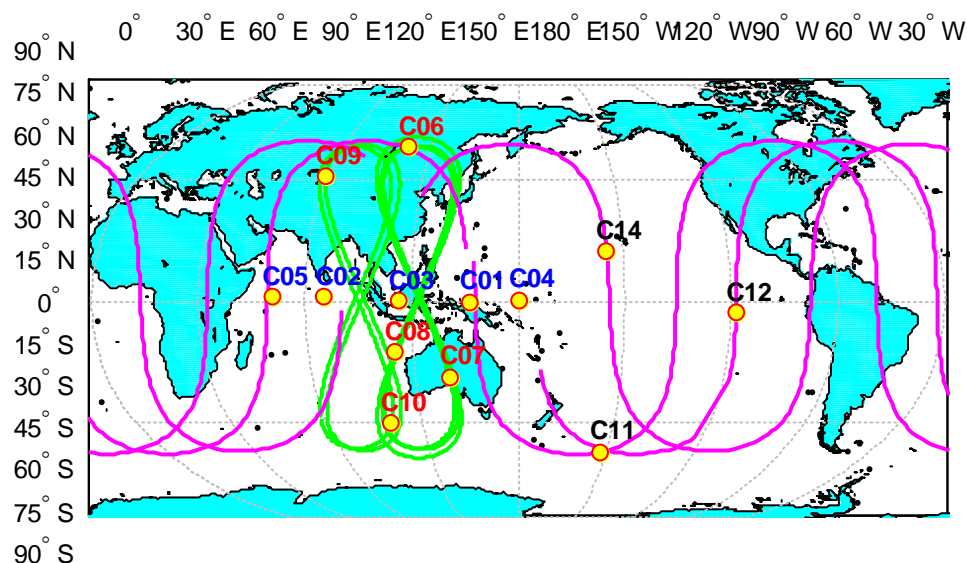


图 1.2 北斗卫星导航系统星下点轨迹图（2016 年 1 月 1 日）

北斗是第一个提供三频信号服务的系统，其频点分别为 B1、B2、B3。

北斗系统已于 2012 年 12 月 27 日开始正式提供服务，其PNT(Positioning, Navigation and Timing)服务精度为在中国及亚太部分地区实现定位精度优于 10m，测速精度优于 0.2m/s，授时精度优于 50ns¹³。截至 2017 年 3 月，正式提供服务的卫星包括 5 颗GEO、6 颗IGSO和 3 颗MEO，另外还有若干颗卫星处于在轨测试阶段。至 2020 年，北斗将全面建成覆盖全球的卫星导航系统，因此在 2020 年之前将发射越来越多的卫星¹⁴。

北斗地面部分由 1 个主控站，2 个注入站和 31 个分布在中国境内的监测站组成。

1.1.5 其他区域卫星导航系统

IRNSS

IRNSS是印度政府建设的区域卫星导航系统，具体由ISRO(Indian Space Research Organisation)负责实施。IRNSS 又称为 NavIC(Navigation Indian Constellation)，其主要目的是为印度及其周边国家提供更可靠的PNT服务¹⁵。

IRNSS 第 1 颗发射卫星于 2013 年 7 月 2 日，第 7 颗(最后一颗)卫星于 2016 年 4 月 28 日发射成功，并正式宣告IRNSS系统的全面建成¹⁶。IRNSS由三颗分布在东经 32.5°、83°、131.5°的GEO卫星和四颗分布在东经 55°和 111.75°的GSO(Geo Synchronous Orbit)卫星组成（见图 1.3）。IRNSS采用频率为 L5(1176.45MHz)和S波段(2492.028MHz)(IRNSS ICD, 2016)。

¹³ <http://www.beidou.gov.cn/>

¹⁴ <http://gpsworld.com/beidou-launch-schedule-shared/>

¹⁵ <http://www.isro.gov.in/spacecraft/satellite-navigation>

¹⁶ <http://www.thehindu.com/sci-tech/science/irNSS-launch-indias-own-regional-navigation-satellite-system-takes-shape/article8531388.ece>

IRNSS的预期服务精度为在印度洋地区（印度周边 1500km内）实现定位精度优于 20m，在印度及GSO辐射地区定位精度优于 10m¹⁷。

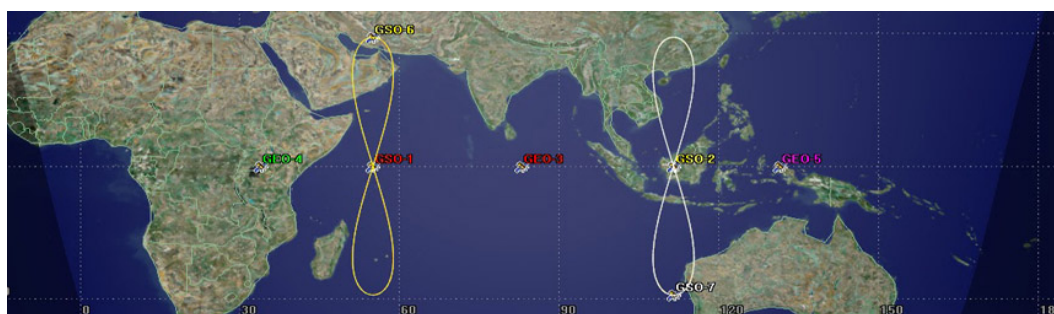


图 1.3 IRNSS 星座分布 (<http://irnss.isro.gov.in/>)

QZSS

QZSS是日本政府建设的区域卫星导航系统，由JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)负责实施。QZSS首颗卫星QZO(Quazi-Zenith Satellite Orbit)卫星Michibiki（意为“指路”）于 2010 年 9 月发射，第二颗QZSS卫星将于 2017 年 6 月份发射¹⁸。QZSS计划在 2018 年之前发射另外两颗QZO卫星和一颗GEO卫星，并在 2022 年之后实现一共 7 颗卫星的区域卫星导航系统¹⁹。图 1.4 为QZSS系统的发展计划。

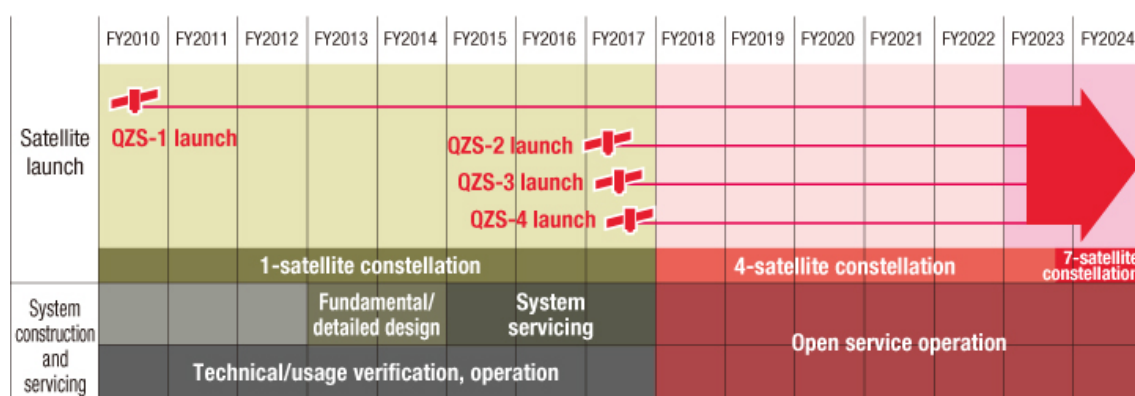


图 1.4 QZSS 发展计划 (http://qzss.go.jp/en/overview/services/sv01_what.html)

与IRNSS不同，QZSS更多是对GPS的补充，以提高日本及其周边地区的可用卫星数。QZSS传输的信号除了与GPS相同的L1、L2、L5 外，还包括L6 信号，L6 主要用于增强定位服务²⁰。

1.2 国内外高精度定位服务系统现状

由于卫星导航系统目前只能提供米级定位服务，为了提高更高精度定位服务，各卫星导航系统都建立了自己的星基增强系统(Satellite Based Augmentation System, SBAS)，如 WAAS、EGNOS 等。与此同时，为了提供更广泛和高精

¹⁷ <http://www.navipedia.net/index.php/NAVIC>

¹⁸ <http://www.insidegnss.com/node/5435>

¹⁹ http://qzss.go.jp/en/overview/services/sv02_why.html

²⁰ http://qzss.go.jp/en/overview/services/sv03_signals.html

度的商用定位服务,许多商业公司也建立了自己的星基增强系统,如 Trimble 的 RTX(Real Time eXtended), Furgto 的 OmniSTAR 等。

1.2.1 广域差分增强系统

目前世界范围内的广域差分增强系统主要有美国的 WAAS(Wide Area Augmentation System)、欧洲的 EGNOS(European Geostationary Navigation Overlay Service)、日本的 MSAS(Multi-Functional Satellite Augmentation System),以及正在建设的印度的 GAGAN(GPS Aided GEO Augmented Navigation)、俄罗斯的 SDCM(System for Differential Correction and Monitoring)和中国 SNAS(Satellite Navigation Augmentation System)。广域差分增强系统通过实时播发轨道、钟差等改正数对广播星历精度进行增强,一般可从精度、完好性、可用性、连续性四个方面对其进行评估。

(1) WAAS

WAAS系统由美国联邦航空局开始建设于 1992 年,主要应用于民航领域,其服务范围为北美地区。WAAS的空间部分由三颗分布在西经 98° 、 107.3° 、 133° 的 GEO 卫星组成²¹,同时还有分布于北美和夏威夷等地的三十多个地面监测站。

WAAS 系统要求在 95%时间内实现定位精度优于 7.6m,实际上在大部分地区能实现定位精度优于 1m,因此 WAAS 能满足航空中一类精密进近的要求。

WAAS将于 2017 年发射新的 GEO 卫星,系统将从 L1 单频转向 L1/L5 双频²²。

(2) EGNOS

EGNOS 是欧空局建设的支持 GPS、GLONASS、Galileo 的广域增强系统,它由 40 个地面监测站和 3 颗位于西经 15.5° 至东经 31.5° 的 GEO 卫星组成,

按照计划,EGNOS需提供优于 7m 平面定位精度,实际上其水平精度一般在 1m 左右。与 WAAS 类似,EGNOS 也将从单频转向双频定位²³。

(3) MSAS

MSAS 是日本的 GPS 广域差分增强系统,于 2007 年 9 月 27 日正式对外宣布运行。它使用两颗 MSAS 卫星(MTSAT-1R,位于 140° E; MTSAT-2,位于 145° E) 发播增强信息,这两颗卫星不仅用于导航,还用于气象应用。

MSAS 在航空中的在途定位精度要求为 220m,实际精度一般优于 2.2m,其可用性优于 99.9%。

(4) SDCM

SDCM 是俄罗斯正在建设的 GLONASS 广域差分增强系统。SDCM 的空间部分由三颗 GEO 卫星组成,分别为 Luch-5A、Luch-5B 和 Luch-4;其地面部分由二十多个分布在俄罗斯和其他国家的地面站组成。未来,俄罗斯还将在世界范围建立更多的监测站²⁴。目前还没有太多关于 SDCM 服务性能的资料。

(5) GAGAN

GAGAN 是印度政府从 2001 年开始建设的 GPS 广域差分增强系统,一共分为技术论证、初步试验、完全运行三个阶段。至 2015 年 11 月,其空间部分共有三

²¹ http://www.navipedia.net/index.php/WAAS_General_Introduction

²² http://www.navipedia.net/index.php/WAAS_Future_and_Evolutions

²³ http://www.navipedia.net/index.php/EGNOS_General_Introduction

²⁴ <http://www.navipedia.net/index.php/SDCM>

颗GEO卫星, 分别为GSAT-8、GSAT-10 和GSAT-15²⁵。地面部分有 15 个参考站, 3 个注入站和 3 个控制中心, 能实现在印度范围内的民航飞机实时导航精度达到水平 1.5m, 高程 2.5m。

(6) SNAS

与其他广域差分增强系统都需要通过另外发射 GEO 卫星来实现导航增强功能不同, 我国北斗系统采用了独特的 GEO+IGSO+MEO 设计, 由运行控制系统直接控制和维护广域差分增强系统, 在系统设计层面就统一考虑开放服务和授权服务, 从而满足不同用户的使用需求。其中开放服务为用户提供基本导航信息, 授权服务为用户提供差分完好性等信息, 实现更安全更高精度的用户 PNT 服务。其中授权服务播发的差分完好性信息由区域导航系统的广域差分增强系统处理得到, 并通过 GEO 卫星将增强信息发送给用户(曹月玲, 2014)。

广域差分增强系统在处理等效钟差和格网电离层改正的同时, 还提供差分改正信息的完好性, 以及用户差分距离误差和格网电离层垂直延迟误差(BDS ICD, 2016)。

然而, 北斗广域差分增强系统的服务性能有进一步完善的空间。其使用的监测网与基本导航的相同, 卫星轨道误差和钟差误差无法完全分离, 其用户定位精度目前只能达到双频 1.6m, 单频 4m (均为 RMS) 的精度(Cao Y, 2012)。

1.2.2 商业星基增强系统及实时精密定位服务

以 RTX 为例, 商业星基增强系统与各个国家政府建立的广域增强系统 (如 WAAS) 的不同主要体现在:

(1) WAAS 主要针对 GPS 进行增强, 而 RTX 可对包括 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 在内的多 GNSS 系统进行增强;

(2) RTX 能提供最高达厘米级的定位精度, 而 WAAS 系统用户定位精度只能在米级。

(3) RTX 服务范围几乎为全球范围, 而 WAAS 等系统仍然只能局限于特定区域。

(4) WAAS 用户定位一般用伪距进行定位, 而 RTX 用户则使用伪距及相位进行定位。

下面对几种商业星基增强系统和实时精密定位服务系统进行简要介绍。

(1) Trimble RTX

天宝(Trimble)公司很早就开始建立其 RTX 星基增强系统。RTX 利用全球分布的监测站进行实时精密定轨, 其实时钟差采样率高达 1Hz, 并将 RTX 改正数通过 GEO 卫星或者网络发送给用户, 以满足高频动态用户定位的需求(Leandro, 2011)。目前 RTX 支持的系统包括 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS, 表 1.1 为 RTX 提供的四种服务的用户定位精度。对于某些型号接收机, 可以在美国部分地区和西欧、中欧大部分地区实现初始化时间小于 5 分钟。图 1.5 中的蓝色区域为 RTX 的服务范围。

²⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/GPS_Aided_GEO_Augmented_Navigation

表 1.1 Trimble RTX 服务类型及精度 (<http://www.trimble.com/positioning-services/>)

服务类型	水平精度 95% (cm)	初始化时间 (分钟)
CenterPoint RTX	<4	<5或者<30
FieldPoint RTX	20	<5或者<30
RangePoint RTX	50	<5
ViewPoint RTX	<100	<5

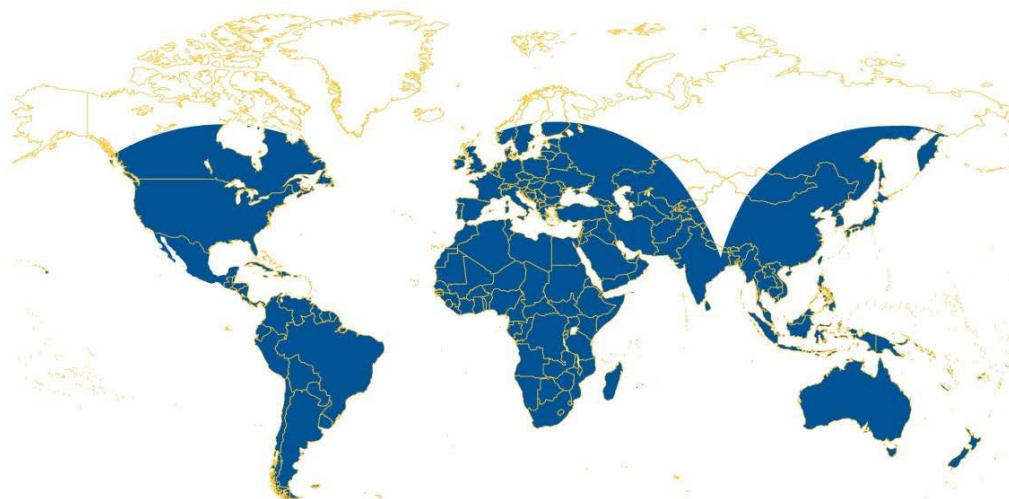


图 1.5 Trimble RTX 服务范围 (<http://www.trimble.com/positioning-services/>)

(2) Fugro 旗下 StarFix、MarineStar 等

荷兰Fugro集团是全球最大的勘测和地质相关服务的综合供应商，旗下有StarFix、SeaStar、MarineStar、OceanStar等多种星基增强服务²⁶。其中StarFix和SeaStar主要服务于海上油气开采方面，StarFix不支持动态定位服务。MarineStar和OceanStar服务于海上非油气行业，MarineStar针对近海领域，OceanStar则是在特定海域相对于已知海道和码头的位置。

以 MarineStar 为例，表 1.2 给出了其不同类型服务的精度水平。图 1.6 为 MarineStar 的 HP(High Performance)服务 2015 年 1 月 1 日在全球近海领域的水平精度。

²⁶ <https://www.fugro.com/our-services/marine-asset-integrity/positioning-services>

表 1.2 MarineStar 增强服务类型

(https://www.fugro.com/our-services/marine-asset-integrity/satellite-positioning/marinestar)

服务	系统	频点	模式	卫星数 (2015 年)	卫星数 (2020 年)	水平 STD	高程 95%
VBS	GPS	L1	参考站	6-16	7-17	13-30cm	60cm-4m
HP	GPS	L1/L2	参考站	6-16	7-17	1-3cm	6-10cm
XP	GPS	L1/L2	轨道+钟差	6-16	7-17	3-5cm	16cm
XP2	GPS	L1/L2	轨道+钟差	12-20	7-17	3cm	12cm
	GLONASS	L1/L2	差				
G2	GPS	L1/L2	轨道+钟差	12-20	7-17	3cm	12cm
	GLONASS	L1/L2	差				
HPG2	GPS	L1/L2	参考站	12-20	7-17	1-3cm	6-12cm
	GLONASS	L1/L2	轨道+钟差				
G4	GPS	L1/L2	轨道+钟差	12-20	30-50	2-3cm	10cm
	GLONASS	L1/L2	差				
	BDS	B1/B2					
	Galileo	E1/E5					

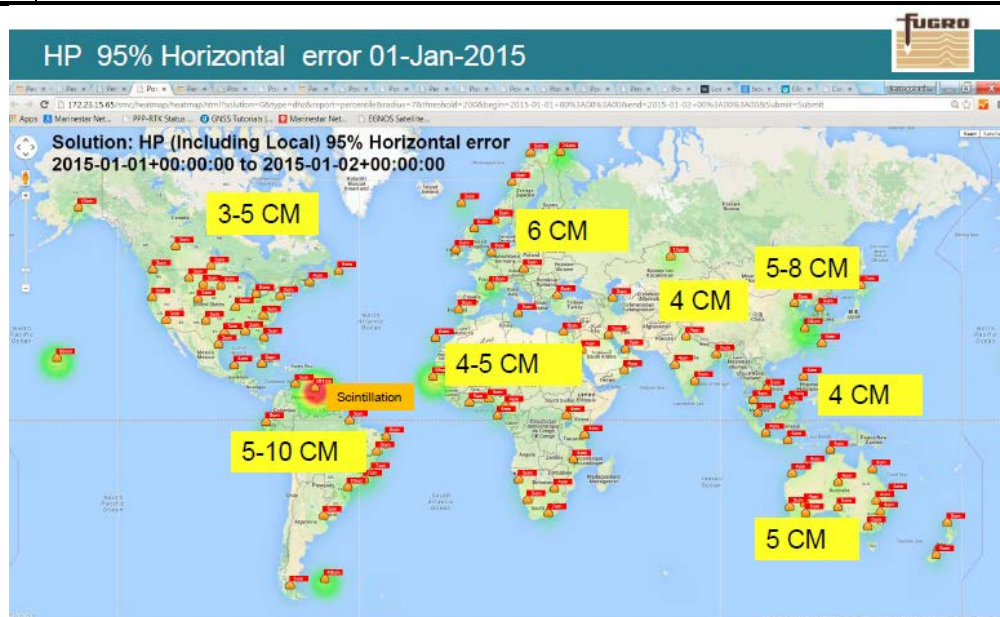


图 1.6 MarineStar 中 HP 服务在全球近海领域的水平精度

(https://www.fugro.com/our-services/marine-asset-integrity/satellite-positioning/marinestar)

(3) OmniStar

OmniSTAR是行业领先的星基增强服务供应商，目前提供VBS、XP、G2、HP四种不同类型的服务，其精度依次由亚米级至厘米级。VBS基于单频伪距，类似于局域差分，其服务精度为亚米级；XP服务通过发布实时轨道钟差改正和对流层改正，其用户定位精度能达到 8~10cm（95%）；G2 服务结合了GPS和

GLONASS, 定位精度与XP服务相当; HP服务通过其全球参考站对各项误差进行进一步优化, 能实现 6~10cm定位精度, 但其服务范围小于其他三种²⁷。

(4) StarFire

StarFire是美国NAVCOM 公司建立的一个全球双频GPS差分定位系统, 它提供了独一无二的可靠性和分米级定位精度, 可靠性达到99.99%。StarFire提供WCT和RTG两种服务。WCT的定位精度为 35cm, RTG定位精度为 10cm。NAVCOM公司提供的SF3040/SF3050两类接收机可分别满足陆地与海洋的定位要求。另外, StarFire也提供RTK定位服务, RTK精度为 2cm²⁸。

(5) Veripos

Veripos系统由Subsea7 公司建立, 在全球建立了超过 80 个参考站, 并在英国和新加坡拥有两个控制中心。控制中心监控Veripos通讯系统的整体性能, 也能为用户提供有关系统性能的实时信息。同时, 具有开启和关闭Veripos增强系统的权限。所提供的定位服务有以下几类: Veripos Apex, Veripos Ultra, Veripos Standard Plus, Veripos Standard, Veripos Glonass。Veripos Apex在地球 76°N 至 76°S 之间可以获得 10cm (95%) 的水平精度。Veripos Apex使用PPP(Precise Point Positioning)技术, 能实现全球高精度GNSS定位服务, 满足海上定位导航应用。Veripos Apex在中国的水平定位精度为 10cm (95%), 高程定位精度为 20cm (95%)²⁹。

(6) IGS-RTS

除了以上商业系统, IGS作为事后定轨精度最高的全球GNSS组织机构, 也于 2012 年开始了RTS(Real-Time Service)服务³⁰。与这些商业系统不同, RTS完全免费, 用户可根据RTCM和NTRIP协议接收RTS通过网络播发的轨道或钟差改正数。

IGS 成立了专门的 RTS 工作组, 各分析中心也各自实时计算轨道或钟差改正数, 目前已经全面支持 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 四大系统的实时轨道和钟差改正数(Rülke, 2016)。

图 1.7 是用于 RTS 计算的 IGS 监测站分布。图 1.8 是在一个位于德国的 IGS 站上使用 RTS 提供三种轨道钟差改正进行动态 PPP 后每天的平面定位误差, 可以看到其定位精度基本在 1 分米左右。

RTS 目前还在对产品可靠性、局限性、广播方式、与商业供应商的竞争等方面进行进一步研究(Jean, 2016)。

²⁷ <http://www.omnistar.com/SubscriptionServices.aspx>

²⁸ [https://en.wikipedia.org/wiki/StarFire_\(navigation_system\)](https://en.wikipedia.org/wiki/StarFire_(navigation_system))

²⁹ <https://sanwen8.cn/p/132JxA.html>

³⁰ <http://www.igs.org/rts/information>

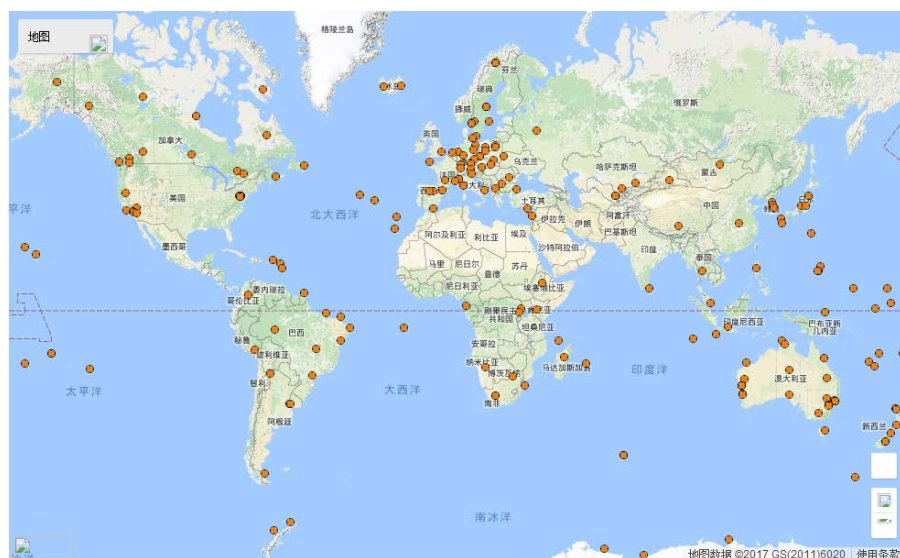


图 1.7 IGS-RTS 监测站分布(<http://www.igs.org/network?network=rts>)

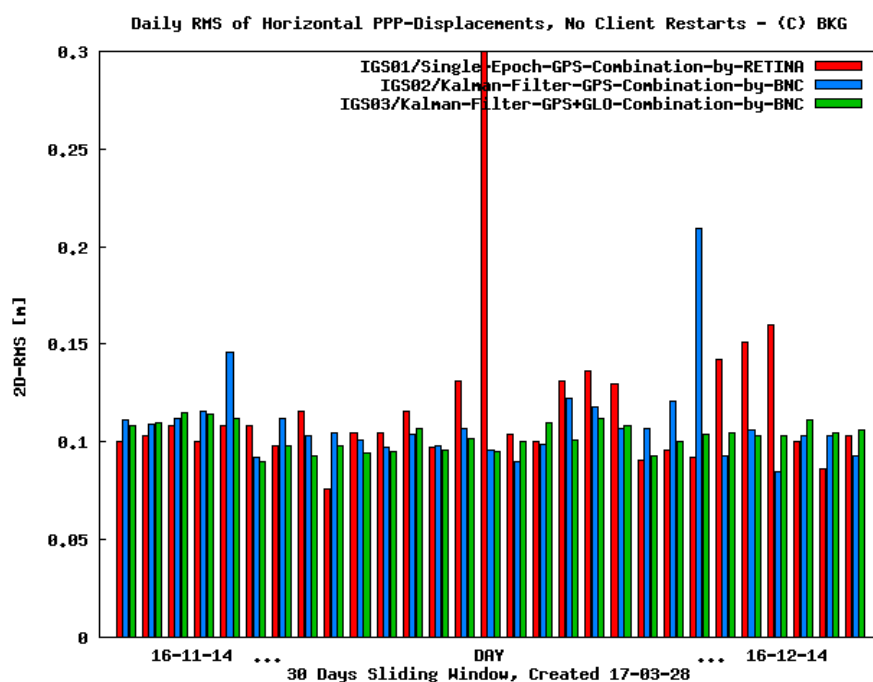


图 1.8 RTS 动态 PPP 定位精度监测(<http://www.igs.org/rts/monitor>)

(7) 国内研究现状

在国内，合众思壮于 2013 年底提出建设中国第一个星基增强系统“中国精度”(Atlas)，并于 2015 年 6 月正式发布。“中国精度”能使我国北斗用户在无需架设基站的情况下，在全球任一地点享受亚米级、分米级和厘米级三种不同精度层级的增强服务。“中国精度”通过 L 波段地球同步轨道通信卫星向全球播发差分数据，使更多地基增强网信号无法覆盖的区域，如海洋、沙漠、山区等也能实现高精度定位服务³¹。

³¹ <http://www.chinacm.org.cn/About.asp>

表 1.3 为“中国精度”提供的服务类型和定位精度。

表 1.3 “中国精度”服务类型及定位精度

服务类型	定位精度
H100	1m 95% (50cm RMS)
H30	30cm 95% (15cm RMS)
H10	8cm 95% (4cm RMS)

另外，国内如武汉大学也建立了针对 GPS 的星基增强系统 MASS，其动态定位精度为平面优于 10cm，高程优于 20cm（施闯，2009；宋伟伟，2011）。但关于其具体应用和推广的相关资料还太少。

国内也有相关学者利用 MGEX 和 iGMAS 数据计算了北斗实时轨道和钟差，其测试效果为北斗实时轨道径向平均精度对于 GEO 卫星优于 20cm，对于 IGSO 与 MEO 一般优于 10cm；钟差精度对于 GEO 卫星为 0.5~4.5ns，对于 IGSO/MEO 为 0.2~2.0ns。基于目前的轨道与钟差结果，实时 PPP 结果可以达到分米级(崔红正, 2015)。但该成果仍处于研究验证阶段。

1.3 研究目的及选题意义

对于我国北斗导航系统，受区域监测网分布和钟差稳定性较差等原因的影响，目前其基本导航能达到水平优于 6m，高程优于 10m 的定位精度(杨元喜，2014)，但该精度仍满足不了高精度用户定位服务的需求。如何进一步提高北斗空间信号精度，是北斗系统满足更多基本导航用户的关键因素。

为了实现更高精度的北斗用户定位需求，我国北斗系统也建立了自己的广域差分增强系统，并通过 GEO 卫星播发等效钟差、格网电离层等增强信息（BDS ICD, 2016）。已经有许多人对此进行了研究(周善石，2007；邢楠，2013；曹月玲，2014)，但受伪距精度的影响，其用户差分距离误差只有 0.5m(Cao Y, 2012)。如何进一步提高用户定位精度，也是我国目前北斗广域差分增强系统改造的重要内容。

因此，本文在国家 863 课题“北斗空间信号精度提升关键技术”和“分米级相位增强信号播发系统技术”的基础上，对北斗空间信号精度的提高和广域增强实时定位服务系统的建设进行研究，以实现北斗系统实时高精度定位服务。

另外，在研究如何提高 GNSS 定位精度之前，还需对影响 GNSS 定位的因素有较全面的认识，因此有必要对 GNSS 精密定位性能进行分析，并研究影响用户定位精度的因素，分析北斗系统与 GPS 等其他系统的差异。

1.4 本文研究内容

基于论文研究目的，本文的主要研究内容包括以下几个部分：

第一章介绍了论文的研究背景，选题意义及国内外研究现状。

第二章介绍 GNSS 精密定位的相关理论，包括时间系统、空间系统、GNSS 观测值模型及其线性组合、GNSS 观测模型误差改正、GNSS 数据预处理和参数

估计理论。

第三章利用 MGEX 数据，基于 Net_PPP 软件对 GNSS 精密定位性能进行了评估，并分析了影响精密定位收敛时间和收敛后精密定位精度的因素。

第四章分析了四大 GNSS 系统广播星历的误差及空间信号精度，着重对北斗广播星历的系统性偏差进行了分析，对北斗广播星历偏差进行预报并分析其对用户定位的影响。

第五章实现了北斗广域增强系统等效钟差的估计，并对影响等效钟差的相关因素进行了分析。

第六章介绍了北斗分区综合改正数的概念，给出了其原理和用户定位模型。基于全国分布的观测站数据实时计算分区综合改正数，并利用实测数据对其进行定位验证，以对分区改正数进行评估，同时分析影响分区改正定位精度的因素。

第七章介绍了 GNSS 精密卫星钟差加密的背景和原理，给出了高频卫星钟差加密的模型和方法，通过实测数据估计高频 GPS/BDS 卫星钟差，从不同方面对其进行评估，并将其用于用户定位中。

第八章对论文进行了总结，并给出了本论文中存在的不足之处和下一步研究计划。

图 1.9 为本文各章研究内容之间的关系。在 GNSS 精密定位理论的基础上对 GNSS 精密定位性能进行了分析，从分析结果中得出卫星轨道和钟差误差及卫星钟差采样率对高精度精度定位的影响非常大。针对前者，分析了北斗广播星历偏差，并分别基于伪距和相位对北斗等效钟差和分区综合改正数进行了研究；针对后者，对 GPS/BDS 卫星钟差加密的方法进行了研究。

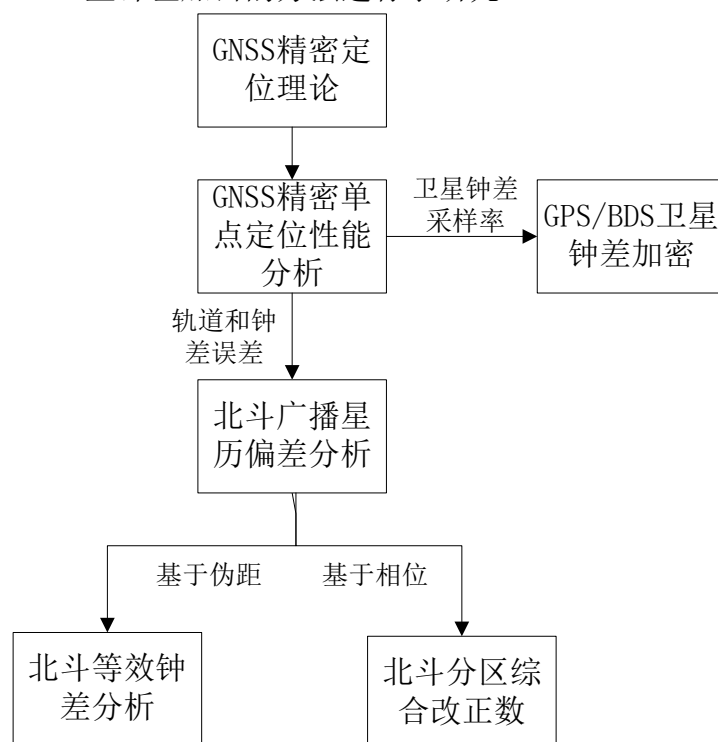


图 1.9 各章之间关系

第 2 章 GNSS 精密定位基础理论

无论是用户接收机的精密定位，还是 GNSS 卫星轨道的确定，都需要在一定的时间和空间基准下进行。不同的卫星导航系统，其时间和空间基准都存在着各不相同的定义。因此需要对其进行明确和区别。在此基础上，可以建立 GNSS 定位的函数模型和随机模型。对于精密定位，需要对影响观测量的各个误差进行建模和改正。基于不同方式的数据预处理，最终可以通过参数估计获得精密位置或用户关心的其他信息。

本章将对以上内容进行介绍。

2.1 时空系统

2.1.1 时间系统

在古代，由于没有精确的时间量测方法，人们对时间的认识主要体现在日夜的变化和季节的交替，这本质上是地球的自转和公转造成的。随着科技的发展，需要一些更为精确的时间测量手段，于是产生了利用原子钟获得的更加稳定的原子时。

根据时间获得的方式，目前常见的时间系统主要可以分为几类（Hofmann-Wellenhof et al., 2003），见表 2.1。

表 2.1 不同时间系统

时间依据	时间基准
地球自转	世界时（UT0、UT1、UT1R、UT2）
地球公转	历书时（ET）、地球动力学时（TDT）、地心力学时（TDB）...
原子钟	协调世界时（UTC）、国际原子时（TAI）、各 GNSS 系统时（GPST, GLNT, GST, BDT...）

（1）基于地球自转的时间系统

世界时（Universal Time, UT），即格林威治地方时，它基于地球的自转。由于地球自转速率曾被认为是均匀的，因此在 1960 年以前，世界时被认为是一种均匀的时间。后来科学家发现地球自转实际上是不均匀的，因此世界时实际上是一种非均匀的时间。

各个天文台观测恒星求得的是世界时的初始值 UT0，尽管早在二百多年前就有人提出地极运动和地球自转的不均匀性，并在后来通过观测得到了证实，但是长期以来，UT0 一直被作为均匀的时间计量系统应用着。但实际上，各个地方测得的 UT0 是不一样的，因此，UT0 现在已经不常用（Urban et al., 2013）。

从 1956 年起，在 UT0 中加入极移改正，相应得到的世界时为 UT1。UT1 通过 VLBI、SLR、GNSS 卫星定轨等方式得到，它在地球上任意一个点上都是一

样的, 因此是目前最常用的世界时³²。UT0 与 UT1 转换关系如下 (赵铭, 1992):

$$UT1 = UT0 - \Delta\lambda = UT0 - (x\sin\lambda_0 + y\cos\lambda_0)\tan\varphi_0 \quad (2.1)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为极移改正, x 和 y 分别为瞬时地极坐标, λ_0 和 φ_0 分别为观测点的地理纬度、地理经度。

在 UT1 的基础上对地球自转的潮汐变化进行改正, 即得到平滑的 UT1R, 它包含 62 个平滑项, 各项的周期在 5.6 天到 18.6 年不等³³。

在 UT1 的基础上对地球自转的季节性变化进行改正, 则得到平滑的 UT2。

目前 UT1R 和 UT2 都已经很少使用, 因此这里不作详细介绍。

(2) 基于原子钟的时间系统

由于世界时的不均匀性, 随着科技的发展, 无法满足高精度应用的需求。因此产生了基于原子钟的原子时。原子时 (Atomic Time, TA) 是一种均匀的时间计量单位, 它的初始历元规定为 1958 年 1 月 1 日世界时 0 时, 秒长定义为铯-133 原子基态的两个超精细能级间在零磁场下跃迁辐射 9192631770 周所持续的时间。

世界原子时 (International Atomic Time, TAI) 由分布在 50 多个国家的超过 400 台原子钟来维持。这些钟主要都是铯钟, 它们通过 GPS 和双向时间比对 (Two-Way satellite Time and Frequency Transfer, TWTFT) 进行比较。

原子时起点定在 1958 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒 (UT), 即规定在这一瞬间原子时时刻与世界时刻重合。但事后发现, 在该瞬间原子时与世界时的时刻之差为 0.0039 秒。这一差值就作为历史事实而保留下来。在确定原子时起点之后, 由于地球自转速度不均匀, 世界时与原子时之间的时差便逐年积累。为了避免世界时的不均匀性, 定义了协调世界时 (Coordinated Universal Time, UTC)。UTC 采用了原子时的秒长, 当 UTC 与 UT1 差异超过 ± 0.9 秒时, 便增加一秒, 称为跳秒 (或闰秒)。跳秒由国际地球自转服务组织 (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) 来维持, 一般在一年中的 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒或 7 月 1 日 0 时 0 分 0 秒进行。IERS 在其官方网站上发布了 UT1 和 UTC 差异 $dUT1$ ³⁴。图 2.1 是 2010 年至今 $dUT1$ 的变化情况, 可以看到 2012 年 7 月 1 日, 2015 年 7 月 1 日, 2017 年 1 月 1 日都发生了跳秒。从 1958 年至今 (2017 年 3 月), 一共发生了 37 秒的跳秒³⁵。跳秒对经济、金融、计算机、航天等需要精密授时的诸多行业有很大影响。

各个机构都维持着自己的 UTC, 称为 UTC(k), 如美国海军天文台的 UTC(USNO), 俄罗斯的 UTC(SU), 中国科学院国家授时中心的 UTC(NTSC)。国际计量局 (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) 对这些结果进行加权平均得到最终的 UTC, 并通过每月的 Circular T 发布 UTC-UTC(k)³⁶。

GPST (GPS Time) 是 GPS 所采用的时间系统, 由 GPS 控制中心维持 (GPS ICD, 2012)。其秒长与原子时相同 (没有跳秒), 起点是 1980 年 1 月 6 日 0 时 0 分 0 秒 (UTC), 其时 UTC 与 TAI 的跳秒数为 19 秒, 故 $TAI-GPST=19s$ 。GPST 与 UTC(USNO) 的时差小于 1ms, 但实际一般在 25ns 以内。

³² https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Time

³³ http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/models/UT1/UT1R_tab.html

³⁴ <https://www.iers.org/iers/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>

³⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Leap_second

³⁶ <http://www.bipm.org/en/bipm/tai/>

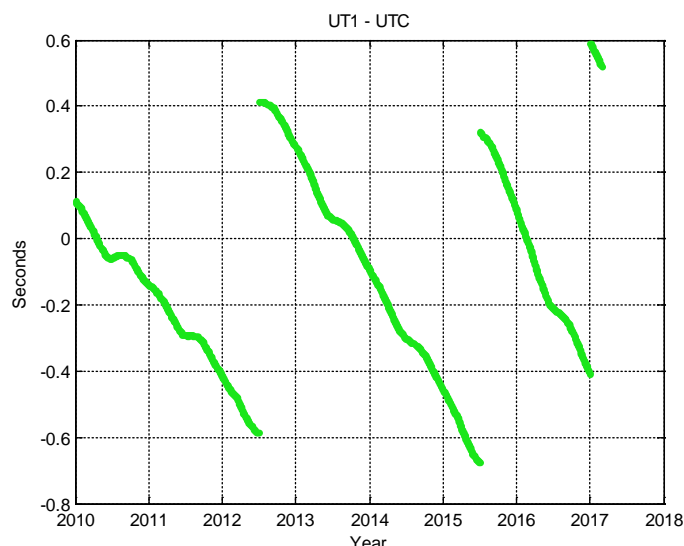


图 2.1 dUT1 (UT1-UTC) 的变化 (2010 年 1 月至 2017 年 2 月)

GLNT(GLONASS Time)是 GLONASS 所采用的时间系统, 由 GLONASS 控制中心维持 (GLONASS ICD, 2008)。与其他系统不一样的是 GLNT 与 UTC 一样存在跳秒, 其与 UTC(SU)相差 3 小时, 同步误差小于 1ms, 实际一般优于 $1\mu s$ 。

GST(Galileo System Time)是 Galileo 系统所采用的时间系统, 由 Galileo 控制中心维持, 其定义与 GPST 类似, 但是从 1999 年 8 月 22 日 0 时 0 分 0 秒 (UTC) 开始计时, 为了与 GPST 一致, 将彼时 GST 与 UTC 的差异设置为 13 秒 (Galileo ICD, 2015)。GST 与 TAI 的时差小于 50ns (Subirana, 2013)。

BDT(BeiDou Time)是 BDS 系统所采用的时间系统, 由 BDS 控制中心维持, 其定义与 GPST、GST 类似, 但是从 2006 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒 (UTC) 开始计时 (BDS ICD, 2016)。与 GPST、GST 不同的是, BDT 与 TAI 的差异是 33 秒, 故 $GPST-BDT=14s$ 。BDT 通过 UTC(NTSC)与国际 UTC 建立联系, 它与 UTC 的时差保持在 100ns 以内。

QZSST(QZSS Time System)是 QZSS 系统所采用的时间系统, 由 JAXA 维持, 其起点定义与 GPST 相同。QZSST 与日本情报通信研究机构 (National Institute of Information and Communications Technology, NICT) 维持的世界时 UTC(NICT)差异在 50ns 以内 (QZSS ICD, 2016)。

IRNSST(IRNSS System Time)是 IRNSS 系统所采用的时间系统, 由 ISRO 维持, 其时间起点定义与 GST 类似 (IRNSS ICD, 2014)。

TAI、UTC 和各 GNSS 时间系统之间的关系见图 2.2。

另外, MGEX 综合广播星历中给出了各个系统之间及与 UTC 之间的时差³⁷, 其中 2016 年的变化情况见图 2.3。可以看到 GPS 与 UTC 的差异 (GP-UT) 最小, GLONASS 与 UTC 的差异 (GL-UT) 变化最大。

(3) 基于地球公转的时间系统

由于世界时的不均匀性, 在天体力学和天体测量上需要一个均匀的时间标尺来进行精确计算。历书时 (Ephemeris Time, ET) 于 1952 年被采用, 它由地球公转决定。原子钟应用以后, ET 的秒长由原子钟定义。但是 ET 没有考虑相对论

³⁷ <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/campaign/mgex/daily/rinex3/yyyy/brdm/>

效应的影响,因而在 1976 年,国际天文联合会(International Astronomical Union, IAU)采用了基于地心的地球力学时(Terrestrial Dynamical Time, TDT)和基于太阳系质心的质心力学时(Barycentric Dynamical Time, TDB)。1991 年,IAU 将 TDT 定义为地球时(Terrestrial Time, TT)。TT 与原子时 TAI 的关系为:

$$TT=TAI+32.184s \quad (2.2)$$

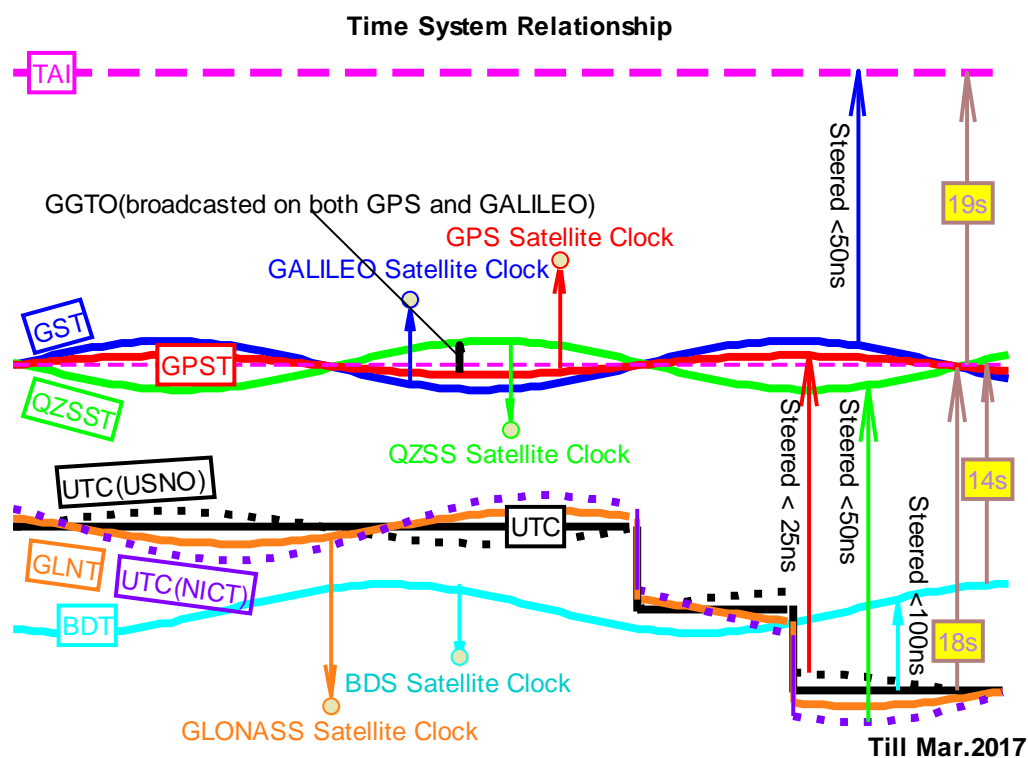


图 2.2 不同原子时系统的关系

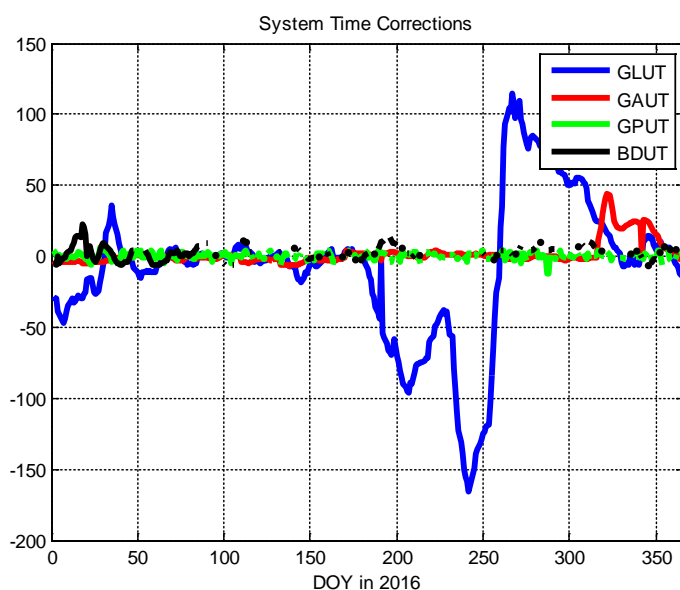


图 2.3 各 GNSS 系统时与 UTC 的差异 (GLUT=GLNT-UTC; GAUT=GST-UTC;
GPUT=GPST-UTC; BDUT=BDT-UTC)

在某些长期时间的应用中, 为了方便计算, 经常用儒略日 (Julian Day, JD) 来表达³⁸。儒略日定义的起点为公元前 4713 年 1 月 5 日 12 时, 以天为单位, 不足一天的部分用小数表示。儒略日与年月日时分秒的转换关系可参考相关 GNSS 教材 (Hofmann-Wellenhof et al., 2008; 李征航, 2010)。

由于儒略日位数较多, 因此 IAU 又引入了约化儒略日 (Modified Julian Day, MJD), 其起点为 1858 年 11 月 7 日 0 时, 与 JD 的转换关系为:

$$MJD = JD - 2400000.5 \quad (2.3)$$

另外, 坐标框架中常用到 J2000 历元, 其参考历元为 2000 年 1 月 1 日 12 时 (JD = 2 451 545.0)。

2.1.2 坐标系统

描述物体的位置时, 需要在一定的坐标系统中。GNSS 定位中常用的坐标系主要有以下几种。

(1) 协议天球坐标系

协议天球坐标系 (Conventional Celestial Reference System, CRS) 是一种近似惯性坐标系 (Subirana, 2013)。它的坐标原点为地球质心, X 轴指向 J2000 历元的平春分点, Z 轴垂直于 J2000 历元地球平赤道面的北极, Y 轴与 X 轴和 Z 轴组成右手坐标系。一般卫星定轨都在惯性坐标系中进行, 因为卫星轨道在惯性系中具有轨道几何特征。通常太阳、月亮等行星的坐标都表示在 CRS 中。

(2) 协议地球坐标系

协议地球坐标系 (Conventional Terrestrial Reference System, TRS) 又称为地心地固坐标系 (Earth-Centred, Earth-Fixed, ECEF)。它固定在地球上, 其坐标原点为地球质心, X 轴在赤道面指向格林威治中央子午线, Z 轴指向协议北极点, Y 轴与 X 轴和 Z 轴组成右手坐标系。GNSS 星历及测站坐标一般表示在 TRS 中。

(3) 站心地平坐标系

站心地平坐标系一般又称为东北天坐标系, 它以测站坐标为原点, X 轴指向正北方向, Y 轴指向正东方向, Z 轴为地球椭球面法线与 X 轴和 Y 轴组成右手坐标系。在计算卫星高度角、方位角, 或者评价定位误差时, 一般使用站心地平坐标系, X、Y、Z 轴的指向通常表示为 E、N、U。

(4) 卫星轨道坐标系

一般在评价卫星轨道误差时会使用卫星轨道坐标系。卫星轨道坐标系的原点为卫星质心, Z 轴指向地球质心, X 轴指向卫星速度方向, X 轴和 Z 轴组成卫星轨道平面, Y 轴与 X 轴和 Z 轴组成右手坐标系。在卫星轨道坐标系中一般把 Z、X、Y 轴的指向称为径向 (Radial)、切向 (Along-track)、和法向 (Cross-track)。其坐标轴的三个方向向量可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_R &= -\frac{\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|} \\ \mathbf{e}_A &= \frac{\mathbf{V}}{|\mathbf{V}|} \\ \mathbf{e}_C &= \mathbf{e}_Z \times \mathbf{e}_X \end{aligned} \quad (2.4)$$

³⁸ 注意儒略日与儒略历的区别。儒略历是古代罗马使用的历法, 是现今公历的前身。

上式中 \mathbf{R} 为卫星坐标, \mathbf{V} 为卫星速度。

(5) 星固坐标系

星固坐标系的原点为卫星质心, Z 轴指向地球质心, 处于动偏(yaw steering)状态的卫星的 Y 轴一般指向 Z 轴与太阳至地球的方向向量组成的平面的法向, X 轴与 Y 轴和 Z 轴组成右手坐标系。卫星的天线相位中心改正一般表示在星固坐标系中, 其坐标轴的三个方向向量可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_Z &= -\frac{\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|} \\ \mathbf{e}_Y &= \frac{\mathbf{e}_Z \times (\mathbf{r}_{\text{Sun}} - \mathbf{r}_{\text{Sat}})}{|\mathbf{e}_Z \times (\mathbf{r}_{\text{Sun}} - \mathbf{r}_{\text{Sat}})|} \\ \mathbf{e}_X &= \mathbf{e}_Z \times \mathbf{e}_Y \end{aligned} \quad (2.5)$$

式中 \mathbf{r}_{Sun} 和 \mathbf{r}_{Sat} 分别为卫星和太阳的位置。

需要注意的是, 对于北斗系统和 QZSS 系统, 其卫星姿态存在零偏(yaw fixed or orbit normal)状态 (Zhou S, 2013; Wang W, 2013; 郭靖, 2014; Guo J, 2017; 毛悦, 2014; 毛悦, 2015; Dai X, 2015; Montenbruck, 2015b; Ishijima Y, 2009)。卫星零偏时星固坐标系与卫星轨道坐标系的定义一致。对于北斗 GEO 卫星, 由于与地球的位置关系较为恒定, 始终采用零偏模式。对于北斗 IGSO、MEO 卫星, 当太阳与卫星轨道面夹角小于一定的控制角度 (约为 4°) 时, 卫星不再跟踪太阳位置, 而是将偏航角固定为 0° , 卫星姿态由动偏转为零偏。IGSO/MEO 卫星每年会经历两次动偏-零偏-动偏转换, 零偏模式持续时间为 8~15 天。对于 QZSS 的 QZO 卫星, 当太阳与卫星轨道面夹角小于 20° 时, 会进行动转零的转换。卫星姿态模式会影响太阳光压模型、卫星天线相位中心改正模型及相位缠绕误差(毛悦, 2015)。

坐标系之间的转换

任意两个坐标系的转化都可以用以下模型表示 (IERS Conventions (2010), 2010):

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{T} + \lambda \cdot \mathbf{R}_{1,2} \cdot \mathbf{X}_1 \quad (2.6)$$

其中 \mathbf{X}_1 与 \mathbf{X}_2 是同一点在两个坐标系中的坐标, \mathbf{T} 为坐标平移参数, λ 为尺度因子, $\mathbf{R}_{1,2}$ 为坐标旋转矩阵, 根据三个坐标轴的旋转角 θ_X 、 θ_Y 、 θ_Z , 该旋转矩阵可表示为 (施一民, 2003):

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{1,2} &= \mathbf{R}_Z(\theta_Z) \mathbf{R}_Y(\theta_Y) \mathbf{R}_X(\theta_X) \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_Z) & \sin(\theta_Z) & 0 \\ -\sin(\theta_Z) & \cos(\theta_Z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_Y) & 0 & -\sin(\theta_Y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_Y) & 0 & \cos(\theta_Y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_X) & \sin(\theta_X) \\ 0 & -\sin(\theta_X) & \cos(\theta_X) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.7)$$

当两个坐标系的坐标轴指向十分接近时，式（2.5）可表示为：

$$\mathbf{R}_{1,2} = \begin{bmatrix} 1 & \theta_z & -\theta_y \\ -\theta_z & 1 & \theta_x \\ \theta_y & -\theta_x & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

若已知（1）坐标系的坐标轴单位向量在（2）坐标系中的方向，则式（2.7）可表示为：

$$\mathbf{R}_{1,2} = [\mathbf{R}_x \quad \mathbf{R}_y \quad \mathbf{R}_z] \quad (2.9)$$

对于 CTS 与 CRS 之间的转换，可通过岁差、章动、自转、极移的转换进行（IERS Conventions (2010), 2010）：

$$[\mathbf{CRS}] = \mathbf{Q}(\mathbf{t}) \cdot \mathbf{R}(\mathbf{t}) \cdot \mathbf{W}(\mathbf{t}) \cdot [\mathbf{TRS}] \quad (2.10)$$

上式中， $\mathbf{Q}(\mathbf{t})$ 为由地球自转轴与黄道面的夹角产生的岁差和章动旋转矩阵， $\mathbf{R}(\mathbf{t})$ 为地球自转角产生的地球自转矩阵， $\mathbf{W}(\mathbf{t})$ 为地球自转轴相对北极点移动造成的极移改正。关于岁差章动的计算，此前一致采用 IAU 1980 模型，后来又提出了 IAU2000 模型，其精度较 IAU1980 模型更高。

IERS在其网站上提供了转换需要的相关参数³⁹，程序源码⁴⁰和例子⁴¹。

2.1.3 参考框架

CTS 的实现基于协议地球参考框架(Conventional Terrestrial Reference Frame, CTRF)，具体是通过全球地面上一系列参考站的坐标和速度来确定的。目前 GNSS 定位中常用的参考框架主要有以下几种。

(1) ITRF

协议地球参考框架(International Terrestrial Reference Frame, ITRF)是IERS维持并更新的，主要通过VLBI, SLR, GNSS 和DORIS观测来实现。由于真实的地心运动是非线性的，因此ITRF框架每隔几年需要更新一次，目前最新的框架为 ITRF2014(Rebischung, 2016)⁴²，ITRF2014 与 ITRF2008 转换参数见表 2.2。

由表可见两个框架平移了 1~2mm，不存在旋转变换，尺度参数对于地面站坐标的影响量级小于 0.2mm，在一般情况下都可以忽略。其他ITRF框架之间的转换参数可参考ITRF网站⁴³。从 2017 年 1 月 29 日（GPSWeek=1934）开始，IGS 采用的参考框架由IGb08 变为最新的IGS14⁴⁴，该框架与 ITRF2014 框架保持一致。

³⁹ <https://www.iers.org/iers/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>

⁴⁰ <http://www.iausofa.org/>

⁴¹ <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=matrice&lang=en>

⁴² http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions

⁴³ http://itrf.ensg.ign.fr/trans_para.php

⁴⁴ <http://www.igs.org/article/igs14-reference-frame-transition>

表 2.2 ITRF2014 至 ITRF2008 转换参数 (参考历元 J2010.0)

类型	T1(mm)	T2(mm)	T3(mm)	$\lambda -1(10^{-9})$	Rx(mas)	Ry(mas)	Rz(mas)
参数	1.6	1.9	2.4	-0.02	0.000	0.000	0.000
精度	0.2	0.1	0.1	0.02	0.006	0.006	0.006
速度	0.0	0.0	-0.1	0.03	0.000	0.000	0.000
精度	0.2	0.1	0.1	0.02	0.006	0.006	0.006

(2) 各 GNSS 系统的参考框架

GPS 系统采用的参考框架为 WGS84(World Geodetic System 84), WGS84 建立于 1984 年, 并每隔一段时间进行更新。最新的 WGS84 框架遵循 IERS Conventions (2010), 与 ITRF 框架的差异在 2cm 以内 (GPS ICD, 2010)。

GLONASS系统采用PZ-90 (Earth Parameters 1990 – Parametry Zemli 1990) 坐标框架。PZ-90 框架建立于 2000 年, 它的北极点为 1990 年至 1995 年的平均北极点, 而WGS84 的则为 1984 年的北极点, 因此这两者存在较大差异⁴⁵。PZ-90 框架与WGS84 框架的转化关系为 (Subirana J, 2013):

$$\begin{bmatrix} X_{\text{WGS84}} \\ Y_{\text{WGS84}} \\ Z_{\text{WGS84}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\text{PZ-90}} \\ Y_{\text{PZ-90}} \\ Z_{\text{PZ-90}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -3 \text{ ppb} & -353 \text{ mas} & 4 \text{ mas} \\ 353 \text{ mas} & -3 \text{ ppb} & 19 \text{ mas} \\ 4 \text{ mas} & -19 \text{ mas} & -3 \text{ ppb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{PZ-90}} \\ Y_{\text{PZ-90}} \\ Z_{\text{PZ-90}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.07 \text{ m} \\ 0.0 \text{ m} \\ -0.77 \text{ m} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

GLONASS 于 2007 年 9 月 20 日将 PZ-90 框架升级为 PZ-90.02, 这个框架与 ITRF2000 框架相近, 只存在一个坐标平移转换 (Subirana J, 2013):

$$\begin{bmatrix} X_{\text{ITRF 2000}} \\ Y_{\text{ITRF 2000}} \\ Z_{\text{ITRF 2000}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\text{PZ-90.02}} \\ Y_{\text{PZ-90.02}} \\ Z_{\text{PZ-90.02}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.36 \text{ m} \\ 0.08 \text{ m} \\ 0.18 \text{ m} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

从 2013 年 12 月 31 日 15 时 (UTC) 开始, GLONASS又将其坐标框架升级为PZ-90.11⁴⁶, 它与ITRF2008 框架在JD2011.0 历元的差异在厘米级 (Vdovin, 2013)。

GALILEO 系统采用的坐标框架为 GTRF(Galileo Terrestrial Reference Frame) (GALILEO ICD, 2015)。GTRF 框架采用超过 100 多个 IGS 站和 13 个 GESS(Galileo Experimental Sensor Stations for the GIOVE mission)站, 并与最新的 ITRF 框架保持一致, 其差异在 3cm 以内 (Fritsche M., 2016; Gendt G., 2011; Söhne W., 2009)。

BDS 系统采用 CGCS2000(China Geodetic Coordinate System 2000)坐标框架 (BDS ICD, 2016), 与 WGS84 框架的差异在厘米级 (陈俊勇, 2008; 高星伟, 2012)。

QZSS系统的坐标框架为JGS(Japan satellite navigation Geodetic System), 其坐标框架的建立与ITRF相近 (QZSS ICD, 2016)。最新的JGS2010 通过 40 多个 (其中包含 9 个QZSS监测站) 的SLR、GPS和QZSS观测数据建立, 与ITRF2008 框架

⁴⁵ <https://en.wikipedia.org/wiki/GLONASS>

⁴⁶ https://www.glonass-iac.ru/en/content/news/?ELEMENT_ID=721

定义一致⁴⁷。

IRNSS 系统采用与 GPS 相同的 WGS84 框架 (IRNSS ICD, 2014)。

图 2.4 是各大 GNSS 系统的坐标框架之间的变化和关系示意图, 可见随着坐标框架的精细化, 各系统坐标之间的差异越来越小, 也越来越接近 ITRF 框架。

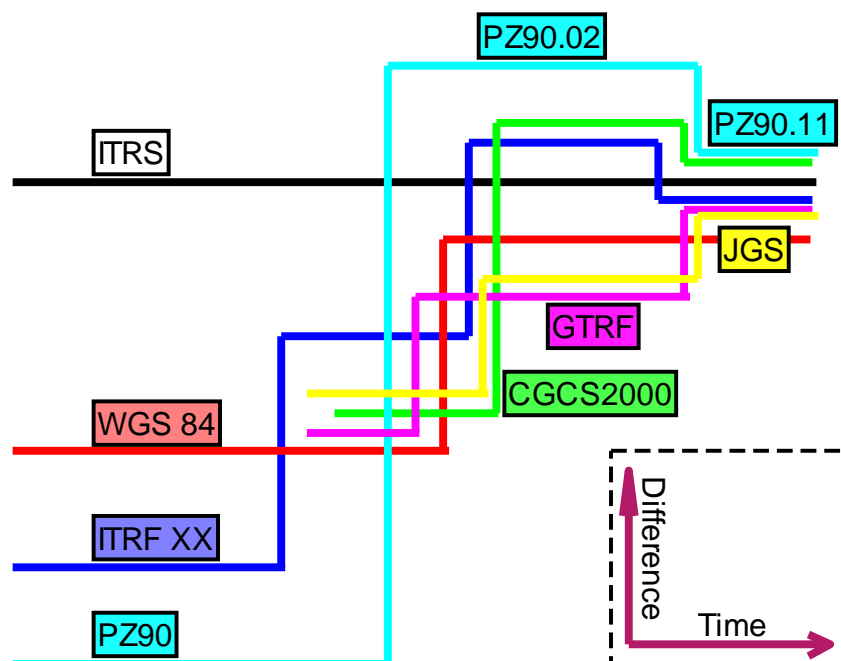


图 2.4 各 GNSS 系统坐标框架与 ITRF 之间的关系

表 2.3 是各大 GNSS 系统所采用的参考框架椭球元素。需要注意的是, 各个参考框架的差异虽然在厘米级, 但其椭球元素各不相同。比如利用广播星历计算卫星坐标时, 若没有区分 CGCS2000 与 WGS-84 的地球自转角速度, 其最大差异可达米级。

表 2.3 不同参考框架的椭球元素

元素	WGS-84/JGS	PZ-90.11	GTRF	CGCS2000
长半径	6378137	6378136	6378136	6378137
扁率	1/298.257223563	1/298.25784	未给出	1/298.257222
自转角速度	7.2921151467d-5	7.292115d-5	7.2921151467d-5	7.292115d-5
引力常数	3.986005d14	3.986004418d14	3.986004418d14	3.986004418d14

2.2 GNSS 观测模型及线性组合

2.2.1 GNSS 观测模型

对于频率 f 上对卫星 j 的伪距观测值, 其观测模型为:

⁴⁷ <http://www.unoosa.org/pdf/icg/2012/template/QZSSUpdated.pdf>

$$P_f^j = \rho^j + c \cdot \overline{\delta t} - c \cdot \overline{\delta t^j} - \Delta_{rela}^j + T^j - \frac{I^j}{f^2} + b_{f,P}^r - b_{f,P}^s + \varepsilon_{P_f} \quad (2.13)$$

式中, P_f^j 为频率 f 上的伪距观测值, ρ^j 为卫星质心至接收机参考点的几何距离, $\overline{\delta t}$ 和 $\overline{\delta t^j}$ 分别为真实的接收机钟差和卫星钟差, Δ_{rela}^j 为相对论效应改正, $\frac{I^j}{f^2}$ 为观测路径上频率 f 上的电离层延迟, $b_{f,P}^r$ 和 $b_{f,P}^s$ 分别为频率 f 上的接收机端和卫星端的伪距硬件延迟, ε_{P_f} 为频率 f 上包含多路径误差, 天线相位中心偏差, 固体潮、海潮、极潮在内的其他误差和伪距观测噪声, c 为光速。

需要注意的是, 式(2.13)中 $\frac{1}{f^2}I^j$ 、 $b_{f,P}^r$ 和 $b_{f,P}^s$ 均与观测频率有关。由于定位时无法区分伪距硬件延迟与真实钟差, 通常将其合并为一个参数, 故式(2.13)可以改写为:

$$P_f^j = \rho^j + c \cdot \delta t_f - c \cdot \delta t_f^j - \Delta_{rela}^j + T^j - \frac{I^j}{f^2} + \varepsilon_{P_f} \quad (2.14)$$

式中,

$$\delta t_f = \overline{\delta t} + b_{f,P}^r, \quad \delta t_f^j = \overline{\delta t^j} + b_{f,P}^s \quad (2.15)$$

δt_f 和 δt_f^j 其实是“伪”接收机钟差和“伪”卫星钟差, 即“伪”接收机钟差包含了接收机端伪距硬件延迟, “伪”卫星钟差包含了卫星端伪距硬件延迟, 但由于无法求得真实卫星钟差和接收机钟差, 因此一般将其认为是在频率 f 上的接收机伪距钟差和卫星伪距钟差。

对于相位观测值, 其观测模型可表达为:

$$L_f^j = \rho^j + c \cdot \overline{\delta t} - c \cdot \overline{\delta t^j} - \Delta_{rela}^j + T^j + \frac{I^j}{f^2} + \lambda_f \cdot \overline{N_f^j} + \lambda_f \cdot W^j + b_{f,L}^r - b_{f,L}^s + \varepsilon_{L_f} \quad (2.16)$$

式中, $\overline{N_f^j}$ 为频率 f 上的相位模糊度 (具有整周特性), λ_f 为频率 f 上的波长, 即 $\lambda_f = c/f$, W^j 为以周为单位的相位缠绕误差, $b_{f,L}^r$ 和 $b_{f,L}^s$ 分别为频率 f 上的接收机端和卫星端相位硬件延迟, ε_{L_f} 为频率 f 上包含多路径误差, 天线相位中心偏差, 固体潮、海潮、极潮在内的其他误差和观测噪声, L_f^j 为频率 f 上以距离为单位的相位观测值, 即:

$$L_f^j = \lambda_f \Phi_f^j \quad (2.17)$$

式中 Φ_f^j 为以周为单位的相位观测值。

与伪距观测模型类似，由于无法区分相位硬件延迟和真实钟差，故将其与真实钟差合并，与式(2.14)类似，式(2.16)可改写为：

$$L_f^j = \rho^j + c \cdot \delta t_{f,L} - c \cdot \delta t_{f,L}^j - \Delta_{\text{rela}}^j + T^j + \frac{I^j}{f^2} + \lambda_f \cdot \overline{N_f^j} + \lambda_f \cdot W^j + \varepsilon_{L_f} \quad (2.18)$$

式中

$$\delta t_{f,L} = \overline{\delta t} + b_{f,L}^r, \quad \delta t_{f,L}^j = \overline{\delta t^j} + b_{f,L}^s \quad (2.19)$$

其中 $\delta t_{f,L}$ 和 $\delta t_{f,L}^j$ 分别为接收机相位钟差和卫星相位钟差，注意与式(2.14)中的伪距钟差的区别，此时相位模糊度仍然保持整周特性。在非差模糊度固定中，“Decoupled Clock Model”方法(Collins, 2008)即认为伪距和相位具有不同的钟差，从而进行相位整周模糊度的固定。

一般情况下，为了与伪距钟差一致，可将式(2.18)改写为：

$$L_f^j = \rho^j + c \cdot \delta t_f - c \cdot \delta t_f^j - \Delta_{\text{rela}}^j + T^j + \frac{I^j}{f^2} + \lambda_f \cdot N_f^j + \lambda_f \cdot W^j + \varepsilon_{L_f} \quad (2.20)$$

式中的 δt_f 和 δt_f^j 与(2.14)具有相同的定义，即为频率 f 上的接收机伪距钟差和卫星伪距钟差。比较式(2.14)、式(2.15)、式(2.18)、式(2.19)，可以发现：

$$\lambda_f \cdot N_f^j = \lambda_f \cdot \overline{N_f^j} + b_{f,L}^r - b_{f,L}^s - b_{f,P}^r + b_{f,P}^s \quad (2.21)$$

式(2.20)中新的卫星模糊度 N_f^j 实际上包含了接收机端和卫星端的伪距、相位硬件延迟组合，已经不再具有整周特性。

2.2.2 观测值线性组合

根据伪距和相位观测模型的特点，以 f_1 和 f_2 频点为例，可以对其进行如下线性组合。为了简化，将伪距和相位表示为 P_1 、 P_2 、 L_1 、 L_2 。

(1) 无电离层组合(Ionosphere-Free combination, IF)

由于不同频点上的电离层延迟与频率的平方成反比，因此可以采用无电离层组合消除一阶电离层误差（超过 99%）。

$$P_{\text{IF}} = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad L_{\text{IF}} = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.22)$$

根据(2.13)和式(2.16)，上式可重写为：

$$P_{\text{IF}} = \rho + c \cdot \delta t - c \cdot \delta t^s - \Delta_{\text{rela}} + T + \varepsilon_{P_{\text{IF}}} \quad (2.23)$$

$$L_{\text{IF}} = \rho + c \cdot \delta t - c \cdot \delta t^s - \Delta_{\text{rela}} + T + \lambda_{\text{IF}} \cdot N_{\text{IF}} + \frac{c}{f_1 + f_2} W + \varepsilon_{L_{\text{IF}}} \quad (2.24)$$

式中, P_{IF} 和 L_{IF} 分别为按照式(2.22)构建的双频伪距和相位无电离层组合观测值, λ_{IF} 为无电离层组合波长, N_{IF} 为无电离层组合相位模糊度, ε_{IF} 为无电离层组合后的多路径误差, 天线相位中心偏差及观测噪声。 δt 和 δt^j 分别为包含无电离层组合后的接收机和卫星硬件延迟的卫星钟差和接收机钟差, 即:

$$\delta t = \overline{\delta t} + b_{IF}^r = \overline{\delta t} + \frac{f_1^2 b_1^r - f_2^2 b_2^r}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.25)$$

$$\delta t^j = \overline{\delta t^j} + b_{IF}^s = \overline{\delta t^j} + \frac{f_1^2 b_1^s - f_2^2 b_2^s}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.26)$$

对于双频观测值, 无电离层组合是最常用的组合方式, 通常精密定轨和定位中也采用无电离层组合。如 IGS 精密星历或 GPS、GLONASS、GALILEO、QZSS、IRNSS 广播星历中的卫星钟差都是基于双频无电离层组合钟差, 即式(2.25)和(2.26)中的 δt 和 δt^j 。它们与其他频率或其他频率组合之间的关系将在 2.3.3 节中作详细介绍。

需要注意的是, 无电离层组合虽然消除了电离层误差, 但也将观测值噪声放大了。假设原始伪距或者相位的噪声为 σ , 根据误差传播定律, 无电离层组合后的噪声为:

$$\sigma_{IF} = \frac{\sqrt{f_1^4 + f_2^4}}{f_1^2 - f_2^2} \sigma \quad (2.27)$$

对于 GPS, 无电离层组合后的观测噪声约为原来的 3 倍。

(2) 电离层残差组合(Geometry-Free combination, GF)

由式(2.13)和式(2.16)可知, 对于双频伪距或相位观测值, 不同频点上与频率无关的误差都可以消除(如对流层误差、相对论误差、卫星真实钟差、接收机真实钟差、卫星质心到接收机参考点的距离等与频率无关的误差), 利用这一特点, 可分别在伪距和相位双频观测值上建立电离层残差组合:

$$P_{GF} = P_2 - P_1, \quad L_{GF} = L_1 - L_2 \quad (2.28)$$

根据(2.13)和式(2.16), 上式可重写为:

$$P_{GF} = \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) - b_{12,P}^r + b_{12,P}^s + \varepsilon_{P_{GF}} \quad (2.29)$$

$$L_{GF} = \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) + B_{GF} + (\lambda_1 - \lambda_2) W + b_{12,L}^r - b_{12,L}^s + \varepsilon_{L_{GF}} \quad (2.30)$$

上式中, P_{GF} 和 L_{GF} 为按照式(2.27)构建的电离层残差观测值, b_{12} 为 L1 和 L2 频点上的硬件延迟差异, ε_{GF} 为 GF 组合后的多路径误差, 天线相位中心偏差及

观测噪声， B_{GF} 为 GF 组合后的模糊度，可表示为：

$$B_{GF} = \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2 \quad (2.31)$$

由于 GF 组合后的硬件延迟偏差、天线相位中心偏差和多路径误差在历元间变化很小，因此 GF 组合一般可以用来进行电离层电子含量估计和周跳探测。

(3) 宽巷组合(Wide-Lane combination, WL)

宽巷组合的公式为：

$$P_W = \frac{f_1 P_1 - f_2 P_2}{f_1 - f_2}, \quad L_W = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} \quad (2.32)$$

根据式(2.16)，上式中的相位宽巷组合可改写为：

$$\begin{aligned} L_W = & \rho + c \cdot \overline{\delta t} - c \cdot \overline{\delta t^s} - \Delta_{rela} + T - \frac{I}{f_1 f_2} + \frac{c}{f_1 - f_2} \cdot (\overline{N_1} - \overline{N_2}) \\ & + \frac{c}{f_1 - f_2} W + \frac{f_1 (b_{L1}^r - b_{L1}^s) - f_2 (b_{L2}^r - b_{L2}^s)}{f_1 - f_2} + \varepsilon_{L_W} \end{aligned} \quad (2.33)$$

从上式可以看出 WL 组合后的相位模糊度为 $\overline{N_1} - \overline{N_2}$ ，其波长为 $\frac{c}{f_1 - f_2}$ ，对

于 GPS，其波长为 86.2cm。

(4) 窄巷组合(Narrow-Lane combination, NL)

窄巷组合的公式为：

$$P_N = \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2}, \quad L_N = \frac{f_1 L_1 + f_2 L_2}{f_1 + f_2} \quad (2.34)$$

根据式(2.13)和式(2.16)，上式中的相位和伪距的窄巷组合可改写为：

$$P_N = \rho + c \cdot \overline{\delta t} - c \cdot \overline{\delta t^s} - \Delta_{rela} + T - \frac{I}{f_1 f_2} + \frac{f_1 (b_{P1}^r - b_{P1}^s) + f_2 (b_{P2}^r - b_{P2}^s)}{f_1 + f_2} + \varepsilon_{P_N} \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} L_N = & \rho + c \cdot \overline{\delta t} - c \cdot \overline{\delta t^s} - \Delta_{rela} + T + \frac{I}{f_1 f_2} + \frac{c}{f_1 + f_2} \cdot (\overline{N_1} + \overline{N_2}) \\ & + \frac{c}{f_1 + f_2} W + \frac{f_1 (b_{L1}^r - b_{L1}^s) + f_2 (b_{L2}^r - b_{L2}^s)}{f_1 + f_2} + \varepsilon_{L_N} \end{aligned} \quad (2.36)$$

从上式可以看出 NL 组合后的相位模糊度为 $\overline{N_1} + \overline{N_2}$ ，其波长为 $\frac{c}{f_1 + f_2}$ 。对

于 GPS，其波长为 10.7cm。

(5) MW 组合(Melbourne-Wubben combination, MW)

MW 组合为相位宽巷组合和伪距窄巷组合的结合，由式(2.32)和式(2.34)可知 MW 组合的公式为：

$$L_w - P_N = \frac{c}{f_1 - f_2} \cdot (\overline{N_1} - \overline{N_2}) + \frac{c}{f_1 - f_2} W + \frac{f_1(b_{L1}^r - b_{L1}^s) - f_2(b_{L2}^r - b_{L2}^s)}{f_1 - f_2} - \frac{f_1(b_{P1}^r - b_{P1}^s) + f_2(b_{P2}^r - b_{P2}^s)}{f_1 + f_2} + \varepsilon_{MW} \quad (2.37)$$

由 MW 组合公式可以看出, MW 组合消除了大部分误差, 组合后的相位观测值的波长为 $\frac{c}{f_1 - f_2}$, 较原始单频波长大大增加了, 故一般利用这一组合进行周跳判断、修复和模糊度固定。

(6) GRAPHIC 组合(Group and Phase Ionospheric Calibration)

由式(2.14)和式(2.20)可知电离层误差对伪距和相位的影响相反, 根据这一特性, 可以建立 GRAPHIC 组合(Jones A V, 1993; Gao Y, 2002):

$$\frac{1}{2}(L_f + P_f) = \rho + c \cdot \delta t_f - c \cdot \delta t^s - \Delta_{rela} + T + \frac{1}{2}\lambda_f \cdot N_f + \frac{1}{2}\lambda_f \cdot W + \varepsilon_{GRAPHIC} \quad (2.38)$$

由于消除了电离层误差, GRAPHIC 组合一般用于单频精密定轨定位(Montenbruck O, 2007; Sterle, 2015; Zhang Y, 2017)。

线性组合电离层及噪声变化

不失一般性, 假设观测值线性组合为:

$$C = a \cdot L_1 + b \cdot L_2 + c \cdot P_1 + d \cdot P_2 \quad (2.39)$$

则组合后的电离层延迟相对 L1 上的电离层延迟变化为:

$$k = f_1^2 \left(\frac{a}{f_1^2} + \frac{b}{f_2^2} - \frac{c}{f_1^2} - \frac{d}{f_2^2} \right) \quad (2.40)$$

假设伪距观测值的噪声为 σ_p , 相位观测值的噪声为 σ_L , 则组合后的噪声为:

$$\sigma_C = \sqrt{(a^2 + b^2)\sigma_L^2 + (c^2 + d^2)\sigma_p^2} \quad (2.41)$$

假设相位观测值的噪声为 0.3cm, 伪距观测值的噪声为 30cm, 以 GPS 为例, 几种线性组合的波长、相对于 L1 的电离层延迟变化及噪声见表 2.4。

表 2.4 几种常用线性组合的特征

组合	a	b	c	d	波长 (cm)	相对于 L1 电离 层误差	噪声 (cm)
L1	1	0	0	0	19.0	1.0	0.3
L2	0	1	0	0	24.4	1.6	0.3
P1	0	0	1	0	——	-1.0	30
P2	0	0	0	1	——	-1.0	30
IF(L1L2)	$\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$	$\frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$	0	0	——	0.0	0.9
IF(P1P2)	0	0	$\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$	$\frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$	——	0.0	90
GF(L1L2)	1	-1	0	0	——	0.6	0.4
GF(P1P2)	0	0	-1	1	——	0.6	42.4
WL(L1L2)	$\frac{f_1}{f_1 - f_2}$	$\frac{-f_2}{f_1 - f_2}$	0	0	86.2	-1.3	1.7
NL(L1L2)	$\frac{f_1}{f_1 + f_2}$	$\frac{f_2}{f_1 + f_2}$	0	0	10.7	1.3	0.2
NL(P1P2)	0	0	$\frac{f_1}{f_1 + f_2}$	$\frac{f_2}{f_1 + f_2}$	——	1.3	21
MW	$\frac{f_1}{f_1 - f_2}$	$\frac{-f_2}{f_1 - f_2}$	$\frac{f_1}{f_1 + f_2}$	$\frac{f_2}{f_1 + f_2}$	86.2	0.0	21
GRAPHIC	0.5	0	0.5	0	19.0	0.0	15

2.3 定位模型误差及改正

由 2.2.1 节伪距和相位观测模型可知，伪距和相位的观测值受到多种误差的影响，有些是相同的（如钟差、对流层延迟、天线相位中心偏差等），也有些是不同的（如电离层延迟、相位缠绕）。图 2.5 为伪距观测值以卫星和接收机相位中心为起点的各误差及其对观测量的影响量级。

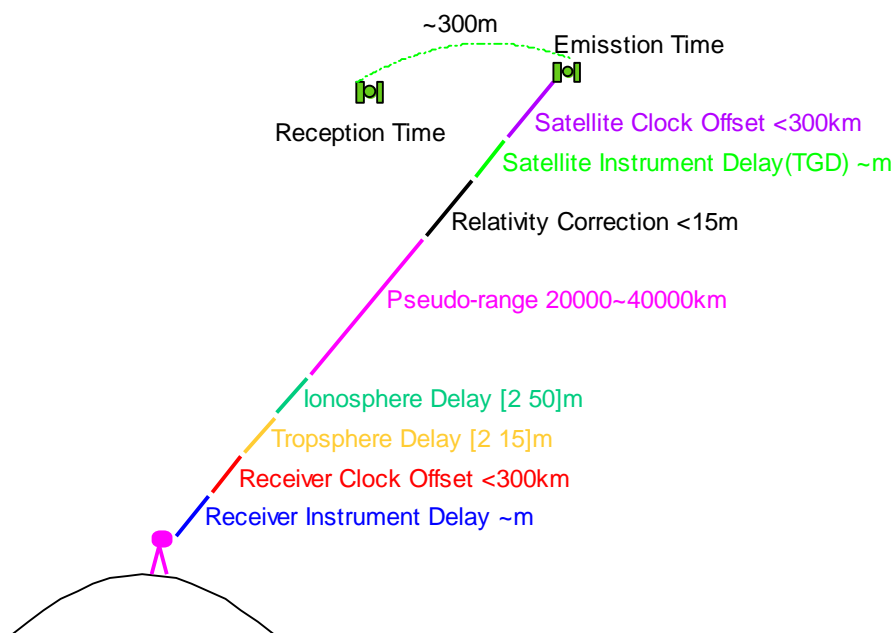


图 2.5 伪距观测值误差及其量级

本节对影响伪距和相位观测值的各个误差进行详细说明。

2.3.1 几何距离和钟差改正

式(2.13)和(2.16)方程右式中量级最大的是几何距离和卫星及接收机钟差，本小节对这两项改正进行说明。

(1) 几何距离

式(2.13)和式(2.16)中卫星至接收机的几何距离可表达为：

$$\rho = \sqrt{(x - x^{\text{sat}})^2 + (y - y^{\text{sat}})^2 + (z - z^{\text{sat}})^2} \quad (2.42)$$

式中 $[x, y, z]$ 和 $[x^{\text{sat}}, y^{\text{sat}}, z^{\text{sat}}]$ 分别接收机和卫星坐标，因此计算卫星至接收机几何距离前须得到卫星坐标。

当卫星星历为广播星历时，可根据广播星历参数计算得到卫星坐标，具体方法可参考各系统的ICD(GPS ICD, 2012; GLONASS ICD, 2008; GALILEO ICD, 2015; BDS ICD, 2016; QZSS ICD, 2013; IRNSS ICD, 2016)，其计算方法基本相同。需要注意的是：(1) 各系统的参考椭球参数不完全相同，具体见表 2.3，不同的参数对卫星坐标计算结果的影响最大可达米级；(2) GLONASS 广播星历提供的是卫星位置、速度和加速度信息，需通过积分计算卫星坐标；(3) 计算北斗 GEO 卫星坐标时，由轨道平面坐标旋转至地心地固坐标时需进行 5 度旋转。

当利用精密星历计算卫星坐标时，一般根据拉格朗日多项式插值(9 阶或 10 阶)进行内插(李征航, 2010; 同济大学, 2004)。

目前 IGS 提供的 GPS 精密轨道的精度约为 $1 \sim 2 \text{cm}^{48}$ ，GPS 广播星历的轨道径向误差在 0.2m 以内(Montenbruck, 2015a)。本文第四章将对 GPS 及其他系统的广播星

⁴⁸ <http://www.igs.org/products> 或 <http://acc.igs.org/>

历轨道误差进行详细分析。

式(2.38)中的卫星坐标是指卫星发射信号的时刻的坐标，而观测值是在接收机接收信号的时刻获得的。由于接收机接收信号时记录的时刻与卫星发射时刻不一样，因此需要计算卫星的真实发射时刻。

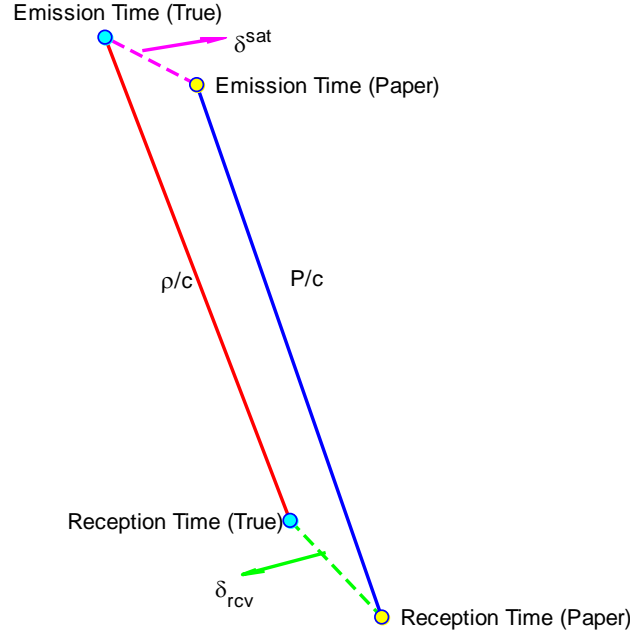


图 2.6 信号发射时刻与接收时刻的关系

图 2.6 为卫星信号发射时刻与接收机信号接收时刻的差异。无论是卫星还是接收机，其记录的时间都是钟面时，与真实的原子时存在差异，这个差异即为卫星钟差 δ^{sat} 和接收机钟差 δ_{rcv} ，见式(2.13)和式(2.14)。结合图 2.6，对于已知的接收机接收信号时刻的钟面时，要计算卫星发射信号的真实时间，可通过以下两种方式。

(1) 由伪距观测值和卫星钟差计算

记接收机接收信号的钟面时为 $T_{\text{rcv,P}}$ ，卫星发射信号的真实时为 $T_{\text{sat,T}}$ ，则有：

$$T_{\text{sat,T}} = T_{\text{rcv,P}} - P/c - \delta^{\text{sat}} \quad (2.43)$$

式中 P 为伪距观测值（一般为无电离层组合观测值），由于伪距观测值和卫星钟差已知，因此 $T_{\text{rcv,P}}$ 无需迭代就可以求得。广播星历中卫星钟差的误差一般小于 5ns 。由图 2.5 可知，伪距观测值传播路径上的其他误差一般小于 100m ，对传播时间的影响小于 $0.33\mu\text{s}$ 。对于 GPS 卫星，其速度约为 4km/s ， $1\mu\text{s}$ 的传播时间误差对卫星位置的影响仅为 4mm （对卫星至接收机几何距离的影响更小）。因此忽略卫星钟差误差和观测路径上的其他误差对卫星位置的影响可以忽略。

这种方法的优点是卫星位置无需迭代即可求得。

(2) 由接收机钟差和几何距离迭代计算

由图 2.6 可以看出另一种计算卫星发射信号的真实时刻的方式为：

$$T_{\text{sat},T} = T_{\text{rcv},P} - \delta_{\text{rcv}} - \rho/c \quad (2.44)$$

式中 ρ 为卫星至接收机的几何距离，由于 ρ 和接收机钟差一般未知，因此 $T_{\text{sat},T}$ 需迭代求得。由前面分析可知，当接收机钟差小于 $1\mu\text{s}$ 时可以忽略，但对于某些接收机，其钟差变化在 $[-1, 1]\text{ms}$ 之间，这时必须先通过伪距观测值计算接收机钟差初值。 ρ 的初值可以用伪距观测值代替，此时 $T_{\text{sat},T}$ 一般迭代 2~3 次即可得到。

图 2.7 显示了 UNX3 站 GPS 接收机钟差初值对几何距离的影响，UNX3 站的接收机类型为 SEPT ASTERX3。由图中可以看出其接收机钟跳频率十分频繁，钟差变化范围在 $[-0.5, 0.5]\text{ms}$ 之间，若忽略该接收机钟差，对几何距离的影响最大可达 0.3m 。因此这种方法必须先计算接收机钟差初值。

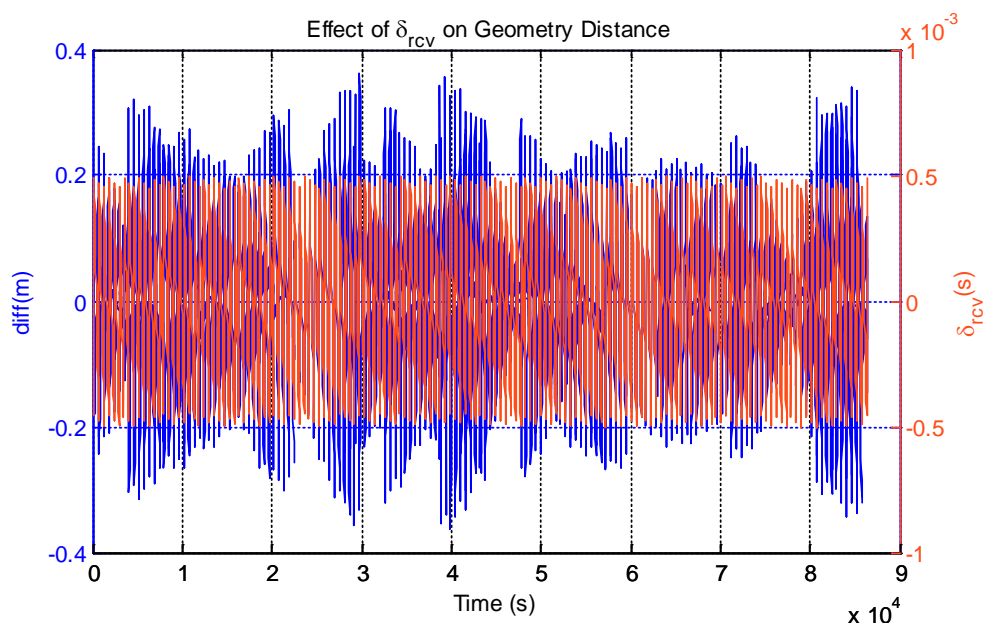


图 2.7 UNX3 站 (33.9° N , 151.2° E) 接收机钟差初值对几何距离的影响 (蓝色线为考虑与不考虑接收机钟差的几何距离差异，橙色线为接收机钟差)

这种方法的优势是即使没有伪距观测值也可以求得卫星坐标，便于模块化实现，同时利用伪距观测值计算接收机钟差初值时也可同时对伪距观测质量进行预处理。

如果在地心地固坐标系下，上述两种方法得到的卫星坐标是在卫星信号发射时刻的地心地固系中，而计算几何距离时必须在同一个坐标系下，因此需要通过地球自转改正将卫星坐标改正到卫星信号接收时刻的地心地固坐标系中。：

$$\mathbf{XYZ}^{\text{sat}} = \mathbf{R}(\theta) \cdot \overline{\mathbf{XYZ}}^{\text{sat}} \quad (2.45)$$

式中 $\overline{\mathbf{XYZ}}^{\text{sat}}$ 为通过星历计算得到的卫星信号发射时刻的坐标， $\mathbf{XYZ}^{\text{sat}}$ 为经过地球自转改正的卫星坐标， $\mathbf{R}(\theta)$ 为地球自转改正旋转矩阵：

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

其中 $\theta = \omega \cdot \rho / c$ ， ω 为地球自转角速度。

如果在惯性系下计算几何距离，则不需要进行地球自转改正。

同时，计算几何距离时也需要获得接收机的近似坐标，可以假设接收机的初始坐标为 0，通过迭代获得接收机的真实坐标，但这种方法计算量较大，一般使用 Bancroft 方法计算接收机的近似坐标(Bancroft, 1985)⁴⁹。

(2) 钟差改正

虽然导航卫星上配备的钟一般为原子钟，但由于钟速、钟漂的影响，它与 TAI 仍然存在一定的差异，这一差异称为卫星钟差，具体可见图 2.2。卫星钟差可通过广播星历或精密星历获得。目前 IGS 提供的 GPS 精密钟差精度约为 0.02~0.06ns，与轨道精度相当⁵⁰。GPS 广播星历钟差的精度约为 2ns (Montenbruck, 2015a)。本文第四章将对 GPS 及其他系统的广播星历钟差误差进行详细分析。

使用精密星历时，可对 30s 或 5min 精密钟差进行线性或二次内插。卫星钟差的采样率对精密定位有较大影响，本文第三章将对其进行分析，第七章将对高采样率卫星钟差的获取进行分析和试验。

使用广播星历时，一般通过钟差参数进行多项式预报：

$$\delta^{\text{sat}} = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \quad (2.47)$$

式中 a_0 、 a_1 、 a_2 为由广播星历获得的钟差参数， t_1 为卫星信号发射时刻， t_2 为星历钟差参考时刻。

需要注意的是，目前 IGS 提供的 GNSS 精密钟差的参考点都是基于 L1L2 (GPS、GLONASS、IRNSS、QZSS)、E1E5a(Galileo)、B1B2(BDS) 无电离层组合，广播星历中 BDS 的钟差参考点则基于 B3 频点，其它系统的参考点与 IGS 精密钟差类似。无论是精密星历还是广播星历，当用户计算其他频点的钟差时，需进行 TGD(Timing Group Delay)/DCB(Differential Code Bias)改正，具体见 2.3.3 节。

接收机钟差一般未知，在单点定位时与坐标一起作为未知参数进行解算。

2.3.2 相对论改正

(1) 距离相对论改正

式(2.42)中的几何距离是欧几里得距离⁵¹。实际上卫星信号在传播过程中还受 Shapiro 延迟的影响⁵²。Shapiro 延迟认为如果广义相对论正确，那么当信号途径一个大引力场时其速度将会减缓，即由引力场引发的时间空间弯曲，因此与欧几里得距离并不一致。这个理论由 Shapiro 于 1964 年提出，又称为距离相对论改正，其改正公式为(Ashby, 2003)：

⁴⁹ <http://kom.aau.dk/~borre/matlab/bancroft/>

⁵⁰ <http://acc.igs.org/>

⁵¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Euclidean_geometry#cite_note-1

⁵² http://www.relativity.li/en/epstein2/read/i0_en/i3_en/

$$d_{\text{shapiro}} = \frac{2GM}{c^2} \ln \left(\frac{r_{\text{rcv}} + r^{\text{sat}} + r_{\text{rcv}}^{\text{sat}}}{r_{\text{rcv}} + r^{\text{sat}} - r_{\text{rcv}}^{\text{sat}}} \right) \quad (2.47)$$

式中, r_{rcv} 和 r^{sat} 分别为接收机和卫星至地心的距离, $r_{\text{rcv}}^{\text{sat}}$ 为卫星至接收机的距离。

图 2.8 为 UNX3 站一天内所有卫星的距离相对论改正, 由图中可以看出距离相对论改正正在 2cm 以内, 但对所有卫星的影响相近, 最大差异在 5mm 以内。对于毫米级精密单点定位, 需考虑该项误差的影响。

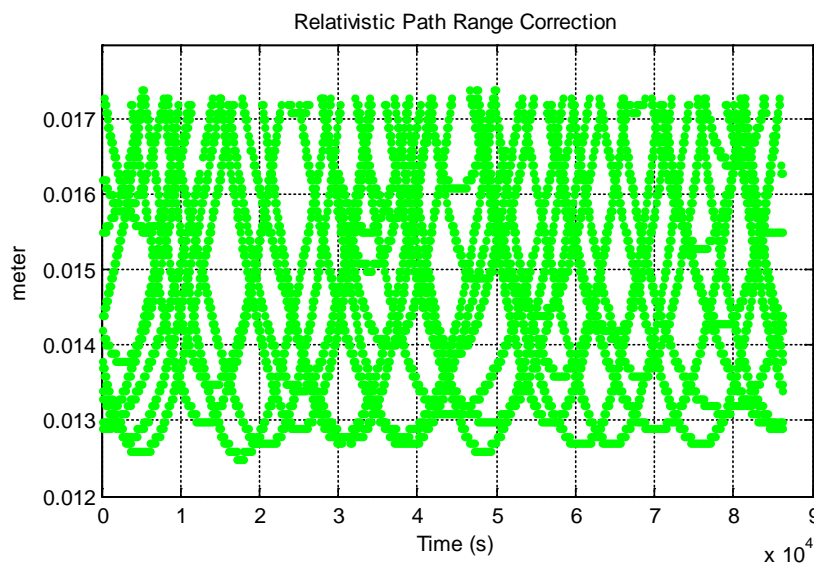


图 2.8 UNX3 站 (33.9° N, 151.2° E) 距离相对论改正

(2) 钟差相对论改正

相同的原子钟, 在卫星上与地面上, 由于受地球引力的影响不一样, 其钟速也不一样, 这本质上是相对论的影响(Ashby, 2003)。相对论效应对钟差的影响可以分为两部分。(1) 常数部分与卫星轨道长半轴相关, 这一部分可以在卫星钟出厂前通过调整频率事先校正。(2) 周期项的部分与卫星轨道偏心率有关, 无法在出厂前校正, 用户必须在定位时进行改正, 其改正公式为:

$$\Delta_{\text{rela}} = - \frac{2 \cdot \mathbf{r}^{\text{sat}} \cdot \mathbf{v}^{\text{sat}}}{c^2} \quad (2.48)$$

上式中 \mathbf{r}^{sat} 和 \mathbf{v}^{sat} 分别为卫星位置和速度向量, Δ_{rela} 是以距离为单位的钟差相对论改正, 与式(2.13)和式(2.16)中的定义相同。

需要注意的是, 在地心地固系下计算卫星速度时, 需扣除卫星自转的影响(虽然对与卫星位置作内积的结果没有影响, 但对卫星轨道坐标系的 Along-track 方向的确有影响)(Subirana, 2013)。

式(2.48)一般在使用精密星历时采用, 使用广播星历时, 可通过下式计算(GPS ICD, 2012):

$$\Delta_{\text{rela}} = F \cdot e \cdot \sqrt{A} \cdot \sin(E_k) \quad (2.49)$$

上式中, e 为卫星轨道偏心率, A 为卫星轨道长半轴, E_k 为卫星轨道偏近地点角, $F = -4.442807633 \times 10^{-10}$ 。

需要注意的是, GLONASS 广播星历中的钟差已经包含了钟差相对论效应改正, 因此在使用时无需考虑(Ashby, 2003; Subirana, 2013; Montenbruck, 2015a)。

图 2.9 为 XMIS 站一天内部分 GPS 和 BDS 卫星的钟差相对论改正, 由图中可看出相对论改正一般在 20m 以内, 其中北斗 GEO 卫星相对论改正最小, 一般在 1m 以内。

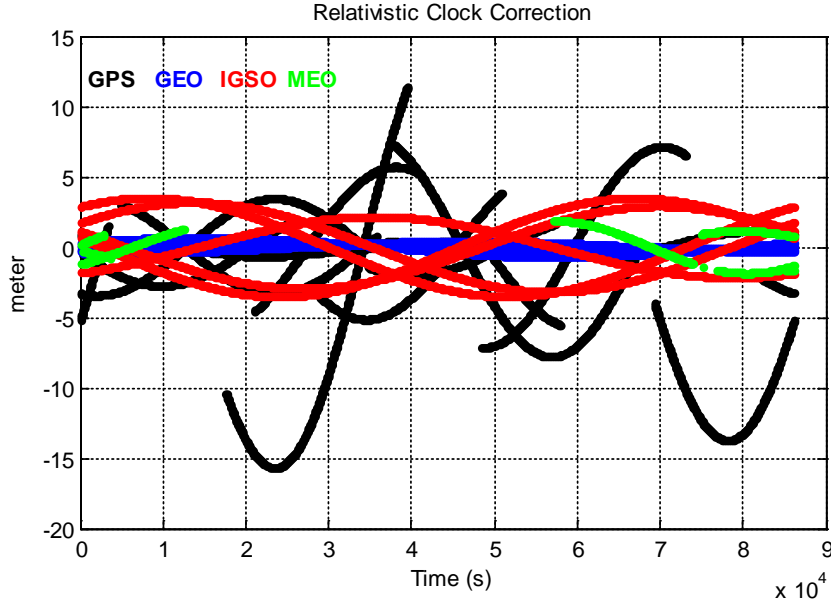


图 2.9 XMIS 站 (10.4° N, 105.7° E) 卫星钟差相对论改正

2.3.3 TGD/DCB 改正

如 2.3.1 中所述, 每个卫星或者接收机的钟差都是相对于某一频点或频点组合而言的, 当计算不同频点的钟差时, 由于硬件延迟的差异, 需要进行 TGD/DCB 改正。

由式(2.13)~(2.15)可知, 若以 L1 频点的“伪”卫星钟差为基准, 则 L2 频点的“伪”卫星钟差为:

$$\delta_2^{\text{sat}} = \delta_1^{\text{sat}} + (b_2^{\text{sat}} - b_1^{\text{sat}}) = \delta_{f1}^{\text{sat}} + \text{DCB}_{12}^{\text{sat}} \quad (2.50)$$

式中, 称 $\text{DCB}_{12}^{\text{sat}}$ 为卫星 L1L2 频点的 DCB。则无电离层组合的钟差为:

$$\delta_{\text{IF}}^{\text{sat}} = \frac{f_1^2 \delta_1^{\text{sat}} - f_2^2 \delta_2^{\text{sat}}}{f_1^2 - f_2^2} = \frac{f_1^2 \delta_1^{\text{sat}} - f_2^2 (\delta_1^{\text{sat}} + \text{DCB}_{12}^{\text{sat}})}{f_1^2 - f_2^2} = \delta_1^{\text{sat}} - \frac{f_2^2 \text{DCB}_{12}^{\text{sat}}}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.51)$$

对于 GPS、QZSS 或 IRNSS, 通常把上式中的第二项称为 TGD, 即:

$$\text{TGD} = - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \text{DCB}_{12}^{\text{sat}} \quad (2.52)$$

GPS、QZSS 和 IRNSS 广播星历中的钟差都是基于无电离层组合的钟差，故其 L1、L2 频点的钟差分别为：

$$\begin{aligned}\delta_1^{\text{sat}} &= \delta_{\text{IF}}^{\text{sat}} - \text{TGD} = \delta_{\text{IF}}^{\text{sat}} + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \text{DCB}_{12}^{\text{sat}} \\ \delta_2^{\text{sat}} &= \delta_{\text{IF}}^{\text{sat}} - \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 \text{TGD} = \delta_{\text{IF}}^{\text{sat}} + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \text{DCB}_{12}^{\text{sat}}\end{aligned}\quad (2.53)$$

2010 年起，GPS Block IIF 卫星上新增了 L5 和 L5I5、L5Q5 两种民用信号 (Montenbruck, 2013)，因而在 TGD 的基础上增加了 4 种 ISC(Inter Signal Correction) 参数，ISC 参数的使用方法可参考相关文献 (Feess, 2013; 王宁波, 2016)。

GALILEO 的 F/NAV 广播星历的钟差基于 E1E5a 无电离层组合，I/NAV 广播星历的钟差则基于 E1E5b 无电离层组合，并分别给出了类似于 TGD 的 BGD(Broadcast Group Delay)，其用法与式(2.53)类似 (GALILEO ICD, 2015)。

GLONASS 的广播星历钟差同样基于 L1L2 无电离层组合，但并未给出 TGD 值 (GLONASS ICD, 2008; Subirana, 2013)。

BDS TGD Correction from Broadcast Ephemeris

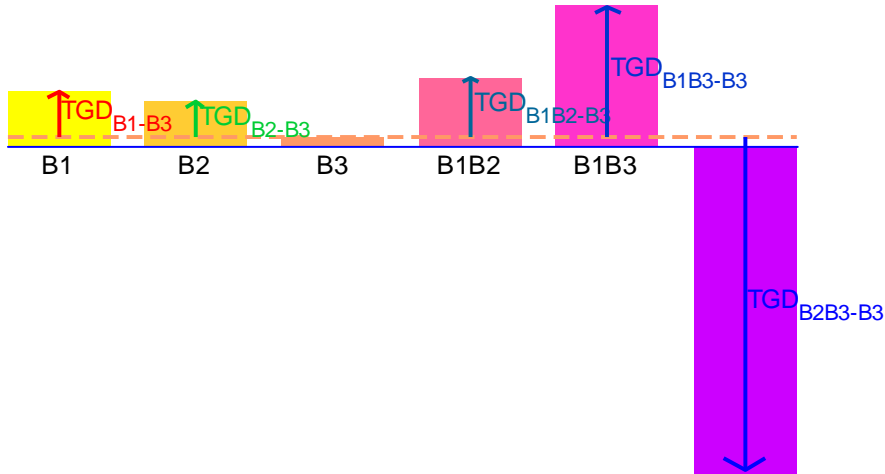


图 2.10 北斗广播星历 TGD 改正示意图

与其他系统不同，BDS 广播星历的卫星钟差则基于 B3 频点 (BDS ICD, 2016)，并同时给出了 B1 和 B2 频点与 B3 频点的硬件延迟偏差 TGD_1 和 TGD_2 (见图 2.10)：

$$\begin{aligned}\text{TGD}_1 &= b_1^{\text{sat}} - b_3^{\text{sat}} = -\text{DCB}_{13} \\ \text{TGD}_2 &= b_2^{\text{sat}} - b_3^{\text{sat}} = -\text{DCB}_{23} = (\text{DCB}_{12} - \text{DCB}_{13})\end{aligned}\quad (2.54)$$

因此北斗其他频率的钟差可表示为 (Montenbruck, 2013)：

$$\begin{aligned}
 \delta_1^{\text{sat}} &= \delta_3^{\text{sat}} - \text{TGD}_1 \\
 \delta_2^{\text{sat}} &= \delta_3^{\text{sat}} - \text{TGD}_2 \\
 \delta_{12}^{\text{sat}} &= \delta_3^{\text{sat}} - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \text{TGD}_1 + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \text{TGD}_2 \\
 \delta_{13}^{\text{sat}} &= \delta_3^{\text{sat}} - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_3^2} \text{TGD}_1 \\
 \delta_{23}^{\text{sat}} &= \delta_3^{\text{sat}} - \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_3^2} \text{TGD}_2
 \end{aligned} \tag{2.55}$$

IGS 精密钟差的参考点都是基于 L1L2 (GPS、GLONASS、IRNSS、QZSS)、E1E5a(Galileo)或 B1B2(BDS) 无电离层组合。它们与其他频点的转换关系如下:

$$\begin{aligned}
 \delta_1^{\text{sat}} &= \delta_{12}^{\text{sat}} + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \text{DCB}_{12}^{\text{sat}} \\
 \delta_2^{\text{sat}} &= \delta_{12}^{\text{sat}} + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \text{DCB}_{12}^{\text{sat}} \\
 \delta_3^{\text{sat}} &= \delta_{12}^{\text{sat}} - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \text{DCB}_{13} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (\text{DCB}_{12} - \text{DCB}_{13}) \\
 \delta_{13}^{\text{sat}} &= \delta_{12}^{\text{sat}} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \text{DCB}_{13} - \frac{f_3^2}{f_1^2 - f_3^2} (\text{DCB}_{12} - \text{DCB}_{13}) \\
 \delta_{23}^{\text{sat}} &= \delta_{12}^{\text{sat}} - \left(\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} + \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_3^2} \right) \text{DCB}_{13} - \frac{f_3^2}{f_2^2 - f_3^2} (\text{DCB}_{12} - \text{DCB}_{13})
 \end{aligned} \tag{2.56}$$

当使用广播星历 TGD 时, 可以用式(2.52)及式(2.54)进行转换。

另外, TGD/DCB 不仅与频率相关, 还与不同的码相关。如 GPS 中 C1 和 P1 码之间也存在偏差 DCB_{P1C1} 。对于不同类型接收机, 其改正方法不一样(Schaer, 2006)⁵³。

(1) 交叉相关(cross-correlated)型接收机, 其改正方法如下:

$$\begin{aligned}
 \text{P1} &= \text{C1} + \text{DCB}_{\text{P1C1}} \\
 \text{P2} &= \text{P2} + \text{DCB}_{\text{P1C1}}
 \end{aligned} \tag{2.57}$$

(2) C1 代替 P1 型接收机, 其改正方法如下:

$$\text{P1} = \text{C1} + \text{DCB}_{\text{P1C1}} \tag{2.58}$$

(3) P1P2 一致型接收机, 无需进行改正。

图 2.11 为 GMSD 站使用北斗广播星历进行 B1B2 伪距单点定位时改正和不改正 TGD 的差异。可以看到, 当使用不同频点的钟差时, 必须进行 TGD 改正。

由于接收机端某一频点的 DCB 对所有卫星都一样, 能被接收机钟差完全吸收, 因此当接收机钟差作为未知参数时可以考虑接收机端 DCB。

⁵³ <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/bcwg/cc2noncc/>

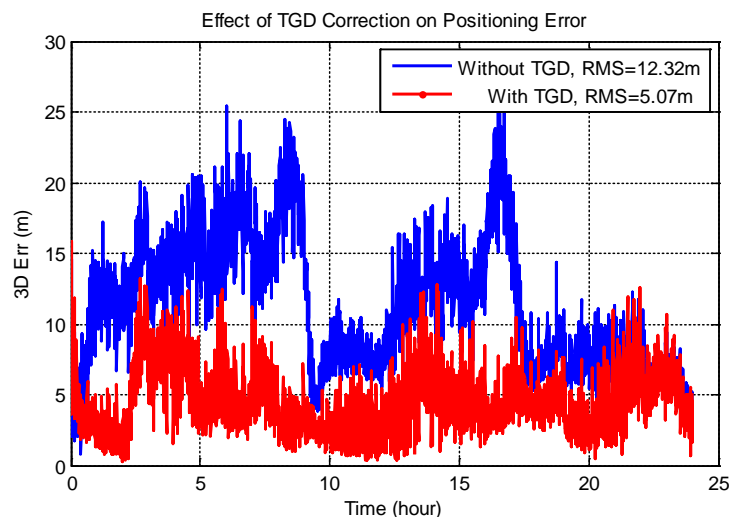


图 2.11 TGD 改正对伪距单点定位的影响

2.3.4 电离层改正

在 60km~2000km 的高空中，存在着大量由于受太阳辐射而被电离的电子，这一领域被称为电离层。GNSS 信号在电离层中的速度受电离层中的电子密度影响，因此夜晚时电离层延迟的影响较小，而白天的影响则较大，尤其是太阳风暴时急剧增大。

电离层延迟可以用下式表示：

$$I_f = \frac{40.3 \cdot 10^{16}}{f^2} \text{STEC} \quad (2.59)$$

式中 STEC(Slant Total Electron Content)为 GNSS 信号传播路径上的电子含量。

由上式可知电离层延迟与信号频率的平方成反比。需要注意的是电离层延迟对伪距和相位的影响相反(Subirana, 2013)。

由于电离层延迟与频率的关系，对于双频数据，可以利用无电离层组合消除电离层延迟误差，具体见 2.2.2。无电离层组合可以消除电离层延迟的一阶项误差，其二阶项误差只有毫米级，在多数情况下可以忽略(Morton, 2009)。

对于单频数据，则需要用电离层模型扣除，实时电离层模型一般采用 Klobuchar8 参数模型(Klobuchar, 1987)，其参数在广播电文中播发给用户。GPS、BDS、IRNSS各系统的Klobuchar模型改正方法大同小异，具体可见其ICD(GPS ICD, 2012; BDS ICD, 2016; IRNSS ICD, 2016)⁵⁴。QZSS虽然也同样播发 Klobuchar8 参数模型，但只能用于日本及其周边区域，对于服务范围之外的，可以采用GPS的电离层参数(QZSS ICD, 2013)。Galileo系统则采用NeQuick模型(Giovanni, 1990; Galileo ICD, 2015)，其计算方法与Klobuchar模型不一样(Arbesser-Rastburg, 2006)⁵⁵。NeQuick模型改正效果约为 73%，优于Klobuchar模型(Angrisano, 2013)。GLONASS广播星历并不播发电离层参数，但是可以采用其

⁵⁴ <https://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox/ovstedal.htm>

⁵⁵ https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo_Ionospheric_Model.pdf

他系统的参数。

另外, BDS、IRNSS、QZSS 还通过广播电文播发更为精确的格网电离层模型, 用户可在服务范围内根据信号穿刺点(Pierce Point)周围的电离层格网点(Ionospheric Grid Point, IGP)内插计算穿刺点垂直方向上的电子含量(Vertical Total Electron Content, VTEC)(BDS ICD, 2016; QZSS ICD, 2013; IRNSS ICD, 2016)。对于 BDS, 其电离层格网的精度为 0.5m, 可用性超过 95%(Wu X, 2014)。

IGS 也提供了每天的全球电子含量图 (Global Ionospheric Maps, GIM)(Hernández-Pajares, 2009)。图 2.12 为某一时刻 GIM 模型中的 VTEC 全球分布情况⁵⁶。利用 GIM 模型计算穿刺点 VTEC 的方法可参考(Schaer, 1998)⁵⁷。

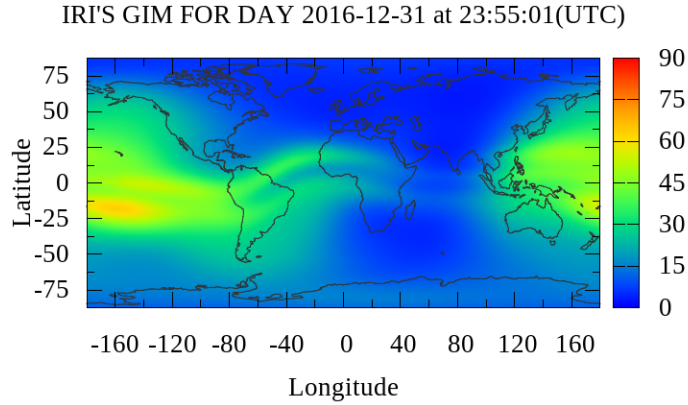


图 2.12 GIM 模型的 VTEC 全球分布情况 (单位:TECU) (<http://ionosphere.cn/>)

电离层格网模型和 GIM 模型都是一种单层薄壳模型, 该模型认为所有的电子含量 VTEC 都集中于某一高度的薄层上。需要注意的是, VETC 是垂直路径上的电子含量, 需要将其转换为 STEC, 其公式为:

$$\text{STEC} = \text{VTEC} / \cos(Z') \quad (2.60)$$

其中,

$$\sin(Z') = \frac{R}{R_0 + H} \sin(Z) \quad (2.61)$$

上式中, R 为接收机至地心的距离, H 为电离层薄壳的高度, R_0 为地球半径(6371km), Z 为卫星天顶角。

图 2.13 为 GMSD 站分别采用无电离层组合、Klobuchar 模型和 GIM 模型后的单点定位结果差异, 可以看到 Klobuchar 模型改正结果最差, GIM 模型定位效果比无电离层组合还更好, 这是由于无电离层组合将观测噪声放大了约三倍。

⁵⁶ <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>

⁵⁷ <http://ftp://ftp.unibe.ch/aiub/ionosphere/>

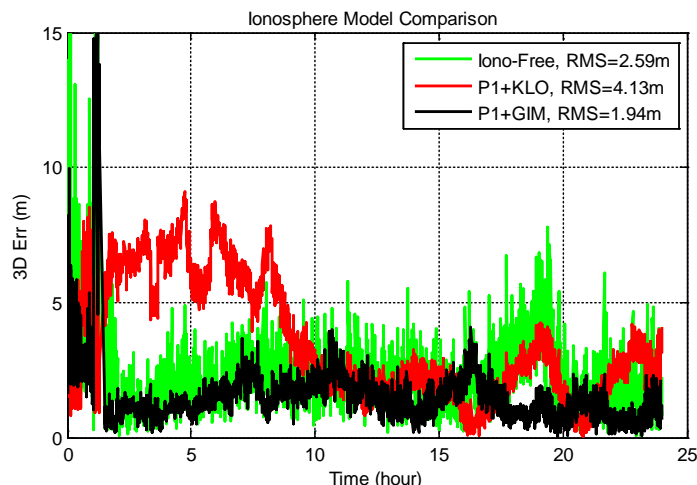


图 2.13 不同电离层模型的定位结果差异

2.3.5 对流层改正

GNSS 信号经过对流层时,受对流层折射的影响,传播路径和传播方向发生变化,从而使信号到达接收机的传播时间发生延迟,这种延迟称为对流层延迟。对流层对电磁波信号产生非色散性延迟,传播速度只与大气折射率和电磁波传播方向有关,与电磁波频率无关,因此对流层信号延迟误差无法像电离层那样通过不同频率的观测值组合进行改正。

天顶方向的对流层延迟约为 2.3m,随着天顶距的增加,相应的延迟量随之增大,当卫星高度角为 10° 时,传播路径上的对流层延迟量可达 13m 左右。对流层延迟约 90%是由干空气引起的,称为干延迟,剩下的是由大气中的水汽引起的,称为湿延迟。对流层延迟可以用天顶方向的延迟及与卫星高度角相关的映射函数来表示:

$$T = ZTD \cdot M(E) = ZHD \cdot M_{\text{dry}}(E) + ZWD \cdot M_{\text{wet}}(E) \quad (2.62)$$

式中右边第一项和第二项分别为传播路径上的对流层干延迟和湿延迟,其中 ZHD(Zenith Hydrostatic Delay)和 ZWD(Zenith Wet Delay)分别为天顶方向的干延迟和湿延迟, $M_{\text{dry}}(E)$ 和 $M_{\text{wet}}(E)$ 分别为对应的映射函数, ZTD(Zenith Tropospheric Delay)为天顶方向的对流层总延迟

天顶干延迟虽然占对流层延迟的大部分,但其变化较为稳定,且与测站气压有关,因此可以用模型精确表达。而湿延迟受大气水汽的影响,变化较不规律,很难用模型精确表达。对于伪距定位,对流层模型的精度已经足够。而对于精密定位,通常用对流层模型改正干延迟和部分湿延迟,湿延迟的剩余部分可以用分段线性函数(王解先, 2011)或随机游走过程(Subirana, 2013)进行参数估计⁵⁸。另外,也有研究认为对流层延迟存在东西和南北方向的梯度差异(Herring, 1992),即在东西和南北方向增加梯度参数,研究表明梯度参数对定位结果的影响在 1mm 以内(Miyazaki, 2003)。

目前常用的全球对流层延迟改正模型主要有 EGNOS(RTCA-MOPS, 1999;

⁵⁸ 实际上,由于干延迟和湿延迟映射函数相近,对流层干延迟模型改正的剩余部分也能被湿延迟参数吸收。

Penna, 2001)、UNB3(Leandro, 2006)、UNB3m(Leandro, 2006)⁵⁹、GPT(Boehm, 2007)、GPT2(Lagler, 2013)、GPT2w(Boehm J, 2015)⁶⁰、IGGtrop(Li W, 2012; Li W, 2015)、GZTD(姚宜斌, 2013; 姚宜斌, 2015)、SHAO_H(赵静旸, 2014)。这些模型的精度一般可达 4~7cm。常用的映射函数有NMF(Niell, 1996)、GMF(Boehm, 2006a)、VMF1(Boehm, 2006b)。这几种映射函数表达形式类似, 差别很小。

图 2.14 为分别采用 UNB3m/NMF 模型和 GPT2w/VMF1 模型计算的 GMSD 站部分卫星的对流层延迟差异, 其中卫星截止高度角为 10° 。可以看到, 随着高度角降至 10° , 最大差异可达到约 13cm, 这主要是由两种对流层模型计算的天顶湿延迟差异(约为 2.5cm)造成的。在精密定位中把对流层湿延迟作为参数时, 这一差异可被参数完全吸收, 因此对定位结果几乎没有影响。第三章将对其进行详细分析。

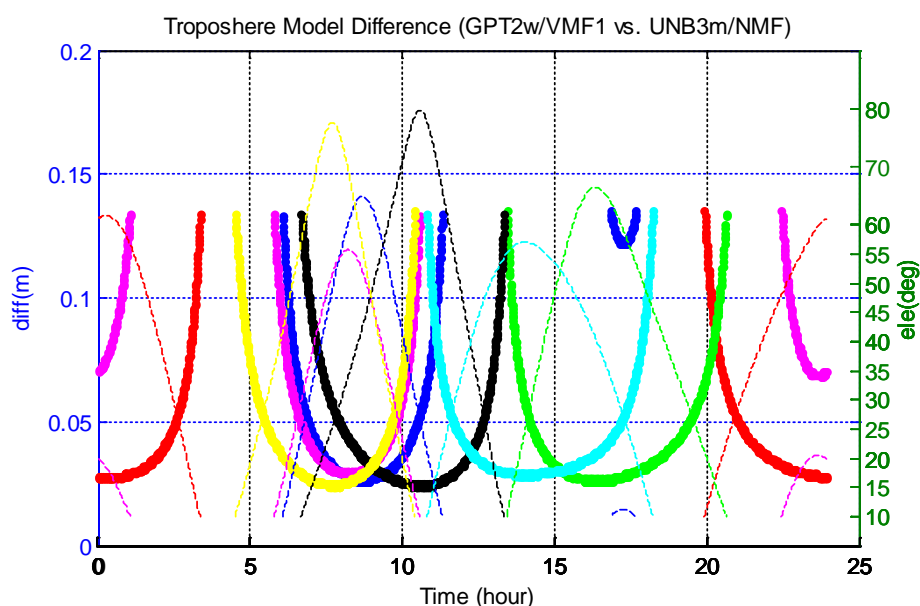


图 2.14 不同对流层模型的对流层延迟差异及与卫星高度角的关系(不同颜色为不同卫星, 粗线表示对流层延迟差异, 细线表示相应卫星的高度角)

2.3.6 PCO/PCV 改正

对于各 GNSS 系统, 广播星历中给出的卫星坐标名义上都是基于信号发射相位中心(Antenna Phase Center, APC), 而精密星历中给出的卫星坐标则是基于卫星质心(Mass Center, MC)。对于接收机, 卫星接收信号的位置是其相位中心, 而一般确定其位置的则是天线参考点(Antenna Reference Point, ARP)。因此, 在利用精密星历计算卫星坐标以及将接收机相位中心归算到参考点坐标时, 需要进行相位中心改正(Phase Center Offset, PCO)。实际上, 天线相位中心并不是一个固定的点, 它随信号的高度角及方位角的变化而变化, PCO 改正后的位置实际上是平均相位中心(Mean Phase Center, MPC), 因此在 PCO 改正的同时还需要进行相位中心变化改正(Phase Center Variation, PCV)(Schmid, 2003; Schmid, 2016)。

⁵⁹ <http://www2.unb.ca/gge/Resources/unb3m/unb3m.html>

⁶⁰ GPT 系列模型及 GMF、VMF1 映射函数均由 Vienna University of Technology 的 Boehm 等人提出, 在其网站上提供了相关程序模型及映射函数的代码及说明, 具体可见 <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE/>

由卫星质心归算至卫星平均天线相位中心的方法为⁶¹:

$$\text{MPC} = \text{MC} + \text{PCO} \quad (2.63)$$

由卫星平均天线相位中心改正至实际接收信号的相位中心的方法为:

$$P = \rho + \text{PCV}(\text{Nad}) \quad (2.64)$$

上式中, $\text{PCV}(\text{Nad})$ 为与卫星信号天底角相关的 PCV 改正。 ρ 为卫星至接收机的几何距离, P 为观测值, 与式(2.13)定义相同。

卫星天线相位中心的偏差在出厂前一般会进行标定, 广播星历中的 PCO 即使用其出厂值。但实际上由于特殊的空间环境, 卫星在天上的 PCO/PCV 会发生变化, 因此 IGS 对天线相位中心 PCO/PCV 进行了重新标定, 并在卫星或接收机 PCO/PCV 更新后发布一次最新的 ANTEX 文件⁶²。

图 2.15 为卫星 PCO/PCV 与卫星质心、相位中心的关系图。

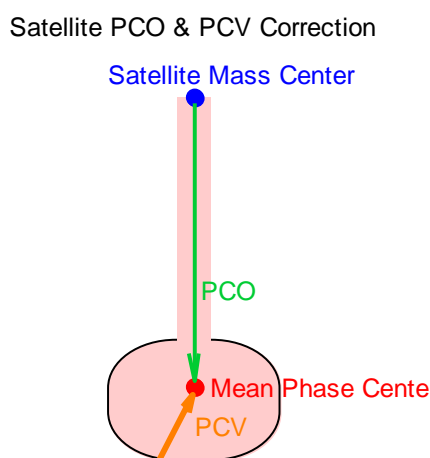


图 2.15 卫星 PCO 及 PCV 改正

理论上, 所有卫星 PCO 在径向变化相同的数, 对用户定位几乎没有影响 (99.7% 可以被接收机钟差吸收), 但是为了与卫星实际坐标接近, 因此 PCO 必须定义在某一具体的坐标框架下。从 2017 年 1 月 29 日 (GPSWeek=1934) 开始, IGS 采用最新的 ITRF2014 框架, 因而卫星 PCO 也随之更新为 igs14.atx⁶³, MGEX 产品则于 2017 年 2 月 12 日 (GPSWeek=1936) 开始更新为 igs14.atx⁶⁴。igs14.atx 与 ITRF2008 框架下的 igs08.atx 的区别主要体现在: (1) 卫星 PCO 的 Z 方向平均减小了 6cm, 即 IGS 地面站坐标的尺度增加了 0.05ppb (3mm); (2) 新增 17 种接收机类型的 PCO/PCV 采用机器人标定, 对 19 种接收机类型的 PCO/PCV 标定进行了更新 (Rebischung, 2016)。

在使用不同 IGS 精密星历时, 需选择其对应的 ANTEX (ANTenna EXchange format) 文件⁶⁵。图 2.16 为 2017 年 3 月 12 日 (GPSWeek=1940) 全球分布的 224 个 IGS 监测站在静态 PPP 模式下分别使用 igs08.atx 和 igs14.atx 进行 PCO/PCV 改正后的定位误差。由图可知 igs08.atx 和 igs14.atx 对定位结果的影响主要体现在高程

⁶¹ <ftp://igs.org/pub/station/general/antex14.txt>

⁶² <http://www.epncb.oma.be/ftp/station/general/>

⁶³ <http://www.igs.org/article/igs14-reference-frame-transition>

⁶⁴ <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex/>

⁶⁵ 一般在精密星历头文件中有相应的使用的 ANTEX 文件。

上, 当使用igs08.atx进行PCO/PCV改正, 其静态PPP精度在高程上降低约 1mm, 所有站的坐标误差均值为-2.3mm。

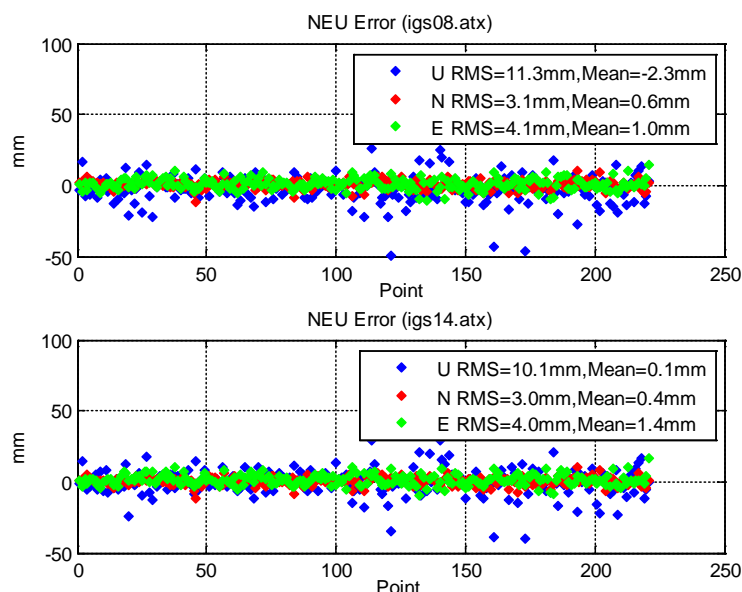


图 2.16 igs08.atx 和 igs14.atx 下 GPS 静态 PPP 定位误差

目前IGS各分析中心除了BDS, 均使用相同的PCO/PCV。对于BDS卫星的PCO改正, CODE使用IGS默认的(0.6, 0.0, 1.1)m的值⁶⁶, GFZ使用ESA发布的值(Dilssner, 2014)⁶⁷, WHU则使用其计算的值(郭靖, 2014; Guo J, 2016)。在使用不同分析中心的产品时需分别使用对应的PCO值。对于PCV, 目前IGS只发布了GPS和GLONASS的PCV, 其他系统的PCV标定仍然是目前IGS的一项工作(Montenbruck, 2017)。

如 2.1.2 所述, 对于 BDS 和 QZSS 系统, 当卫星零偏时, 其星固坐标系的定义与动偏不一样, 此时其 PCO 也应按照零偏状态进行改正。

接收机ARP至相位中心的PCO/PCV改正与卫星类似, 不同的是接收机的PCV除了与高度角相关, 还与方位角相关。早期的接收机PCO/PCV偏差是指相对偏差, 即以AOAD/M_T天线作为基准, 其他天线与其作零基线测量进行标定⁶⁸。从2006年11月5日开始, IGS将相对天线相位中心偏差改为绝对天线相位中心偏差, 其PCO/PCV是由测量机器人标定的, 这样的好处是能测得低至0°高度角的接收机PCV(Subirana, 2013)。

值得注意的是, 接收机天线的PCO对于不同频点一般不一样, PCV对于不同GNSS系统也有略微差别。与TGD/DCB改正类似, 当归算至不同频点的APC时需根据频率进行改正。但目前IGS的PCO/PCV只对L1、L2频点进行了标定(Montenbruck, 2017), NGS(National Geodetic Survey)也提供了各种类型接收机的PCO/PCV⁶⁹。

另外, 接收机天线参考点至标识中心一般不在同一个点上, 当归算至标识中心坐标时需要对这个差异进行改正⁷⁰。

⁶⁶ http://mgex.igs.org/IGS_MGEX_Status_BDS.html

⁶⁷ <http://www.gfz-potsdam.de/en/section/space-geodetic-techniques/projects/mgex-beidou-analysis/>

⁶⁸ <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2005/msg00111.html>

⁶⁹ <https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/#>

⁷⁰ 一般在 RINEX 观测文件的头文件中给出。

图 2.17 为 TRM59800.00 SCIS 型接收机天线的 PCV 随高度角、方位角的变化情况。可以看到 PCV 主要与高度角相关，低高度角的接收机 PCV 超过了 1cm，因此在精密定位中必须予以考虑。

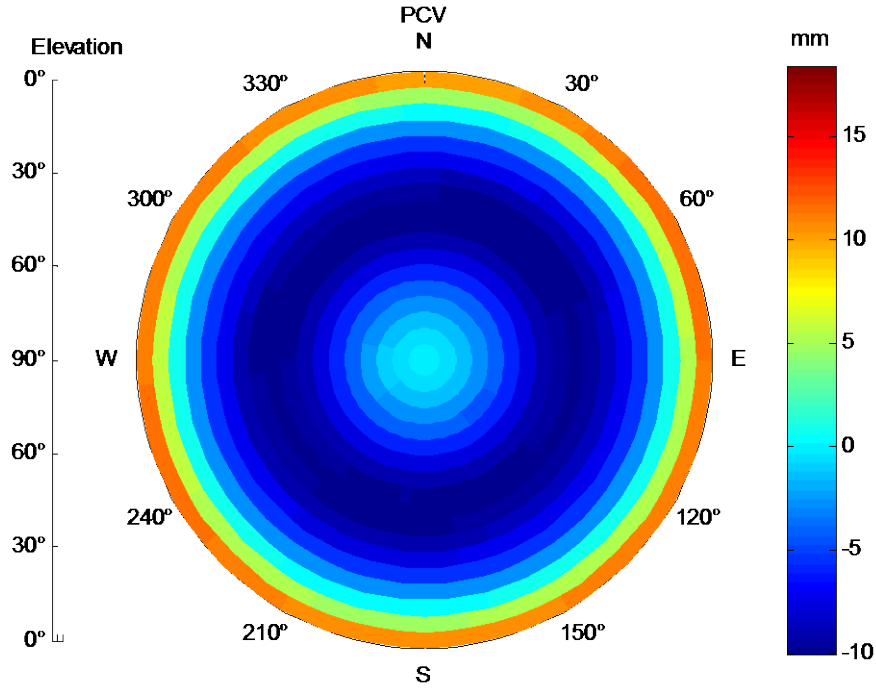


图 2.17 接收机 PCV 变化情况 (TRM59800.00 SCIS)

2.3.7 相位缠绕改正

卫星在发射信号时由于天线的右旋极化，会对相位观测值产生相位缠绕误差 (Wu J T, 1991)。对于精密定位，必须对相位缠绕误差进行改正，其改正公式如下：

$$\Delta\Phi = N + \delta\phi \quad (2.65)$$

其中

$$\delta\phi = \text{sign}(\zeta) \cdot \arccos\left(\frac{\bar{\mathbf{D}} \cdot \bar{\mathbf{D}}'}{\|\bar{\mathbf{D}}\| \cdot \|\bar{\mathbf{D}}'\|}\right) \quad (2.66)$$

$$N = \text{nint}[\Delta\Phi_{\text{previous}} - \delta\phi] \quad (2.67)$$

上式中， N 的初值为 0，其他变量定义如下：

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{D}} &= \mathbf{a} - \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}) + \mathbf{k} \times \mathbf{b} \\ \bar{\mathbf{D}}' &= \mathbf{a}' - \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}') + \mathbf{k} \times \mathbf{b}' \\ \zeta &= \mathbf{k} \cdot (\bar{\mathbf{D}} \times \bar{\mathbf{D}}') \end{aligned} \quad (2.68)$$

上式中， \mathbf{k} 为卫星至接收机的向量， \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 和 \mathbf{a}' 、 \mathbf{b}' 分别为站心地平坐标系和卫星星固坐标系的 X、Y 方向单位向量在 CRS 或者 TRS 下的方向向量，见图

2.18。

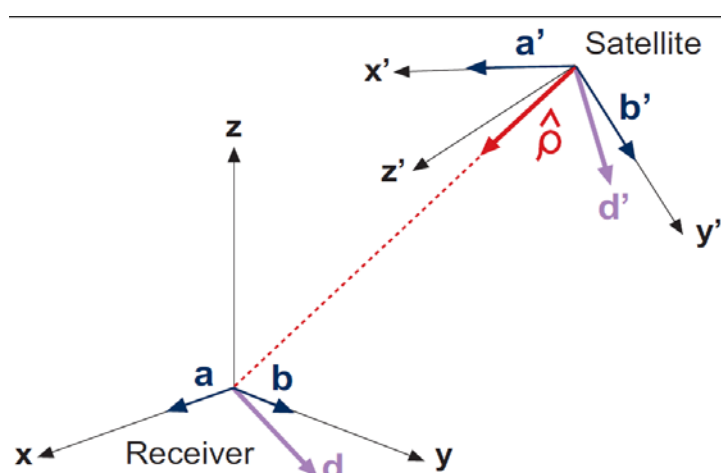


图 2.18 相位缠绕改正示意图 (Subirana, 2013)

从相位缠绕改正公式可以看出，相位缠绕与卫星天线和接收机的相对位置有关，因此对于 BDS 或者 QZSS 零偏状态下的卫星，其相位缠绕误差对于静止的接收机始终不变，可以不改正而被相位模糊度完全吸收。

图 2.19 为 GMSD 站一天内各 GPS 卫星的相位缠绕变化情况，可以看到其变化始终在 1 周以内。

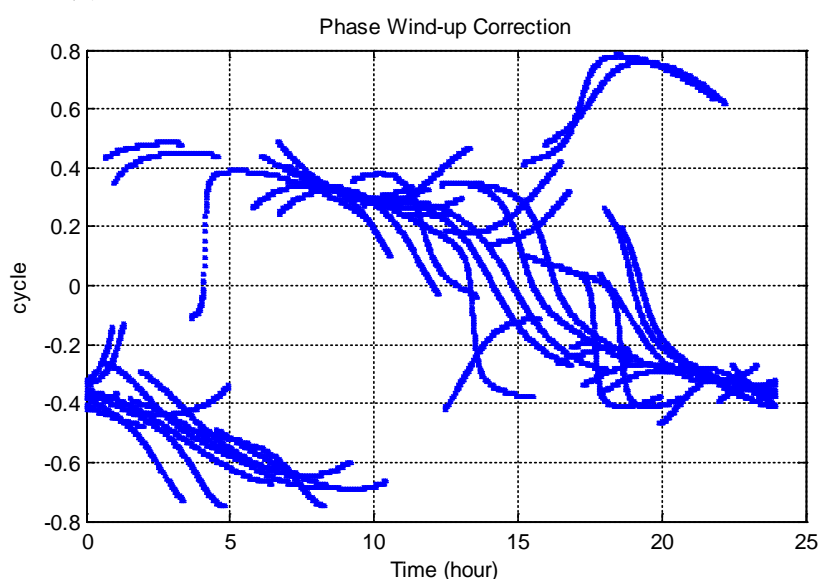


图 2.19 GMSD 站 GPS 卫星的相位缠绕变化

2.3.8 地球形变改正

受太阳月球引力、潮汐运动、地球自转轴漂移等因素的影响，地球上的点在 ITRF 框架中会发生移动，因此对于精密定位，还必须进行固体潮、海潮、极潮的改正(IERS Conventions (2010), 2010)。其改正公式为：

$$\mathbf{r}_M = \mathbf{r}_{M0} + \Delta\mathbf{r}_{\text{sol}} + \Delta\mathbf{r}_{\text{ocean}} + \Delta\mathbf{r}_{\text{pole}} \quad (2.69)$$

上式中, \mathbf{r}_M 为接收机随时间变化的实际坐标, \mathbf{r}_{M0} 为接收机参考点坐标,

$\Delta\mathbf{r}_{sol}$ 、 $\Delta\mathbf{r}_{ocean}$ 和 $\Delta\mathbf{r}_{pole}$ 分别为固体潮、海潮和极潮改正。

(1) 固体潮(Solid Tide)

固体潮的主要是地球受太阳、月亮的引力的影响造成的地球形变,可以用 $n \times m$ 阶 Love 数和 Shida 数的球谐函数表达(IERS Conventions (2010), 2010)。固体潮由与纬度相关的固定形变和与时间有关的半日及一日周期振幅形变组成,最大在水平方向上可达 5cm, 高程方向上可达 30cm。其周期变化部分可以被 24 小时的静态定位模式平均,但是固定形变部分则无法消除。在中纬度地区,这一形变最大可达 12cm。固体潮对单点定位的影响在高程上最大可达 12cm,因此,固体潮改正在精密单点定位中必须考虑(Kouba, 2002)。

IERS在其服务器上提供了计算固体潮的程序DEHANTTIDEINEL.F⁷¹。

(2) 海潮(Ocean Tide)

海潮主要是由地球的潮汐变化引起的地球形变。与固体潮类似,海潮也主要由一日及半日周期变化组成,但海潮变化比固体潮小一个量级。海潮不含固定形变部分,与测站经纬度高度相关。对于定位精度要求低于 5cm,或者观测时间为 24 小时周期的静态定位,或者远离海洋的测站,海潮改正可以不用考虑(Kouba, 2002)。

海潮改正的公式由 11 个潮波系数构成(IERS Conventions (2010), 2010),瑞典的 Onsala 空间天文台提供了全球地区这些系数的在线计算,用户只要输入测站的经纬度高程或空间坐标,即可得到该测站的海潮系数⁷²。从 IERS Conventions 2010 起,计算海潮系数的模型从 IERS Conventions 2003 的 CSR 3.0 变更为 FES2004,各大 IGS 分析中心在定轨定位中也采用 FES2004 海潮模型(Bock, 2012)。

IERS在其服务器上提供了根据海潮系数计算海潮改正的程序 ARG2.F 和 HARDISP.F⁷³。

(3) 极潮(Pole Tide)

极潮是由地球的自转轴的偏移造成的(即钱德勒摆动,其周期约为 14 个月)。极潮的改正公式为(Kouba, 2002):

$$\begin{aligned}\Delta N &= -9 \cos 2\varphi [(X_p - \bar{X}_p) \cos \lambda - (Y_p - \bar{Y}_p) \sin \lambda] \\ \Delta E &= 9 \sin \varphi [(X_p - \bar{X}_p) \sin \lambda + (Y_p - \bar{Y}_p) \cos \lambda] \\ \Delta U &= -33 \sin 2\varphi [(X_p - \bar{X}_p) \cos \lambda - (Y_p - \bar{Y}_p) \sin \lambda]\end{aligned}\quad (2.70)$$

式中, X_p 和 Y_p 为地球极移, \bar{X}_p 和 \bar{Y}_p 为地球平均极移,其单位为弧度秒, φ 和 λ 为测站纬度和经度, $[\Delta N, \Delta E, \Delta U]$ 为测站在站心地平坐标系下的偏差,单位是 mm。

从上式可以看出,极潮的变化与极移有关,它的变化十分缓慢,其周期呈现出季节性和钱德勒周期性(约 14 个月)。极移的变化最大可以达到 0.8 秒,因此极潮在高程上最大可达到 2.5cm,水平上最大可达到 0.7cm(Kouba, 2002)。对于

⁷¹ <ftp://tai.bipm.org/iers/conv2010/chapter7/dehanttideinel/>

⁷² <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>

⁷³ <ftp://tai.bipm.org/iers/conv2010/chapter7/>

24 小时或者短时间的数据，由于极潮改正变化非常小，大部分可以被接收机钟差吸收，因此极潮也可以不用考虑。当计算连续几个月的数据时，需要将极潮改正考虑在内(Subirana, 2013)。

图 2.20 为 GMSD 站一天内的固体潮、海潮、极潮改正在 NEU 方向上的变化。可以看到固体潮影响最大，海潮次之，且呈现周期性，极潮最小，且几乎不变。

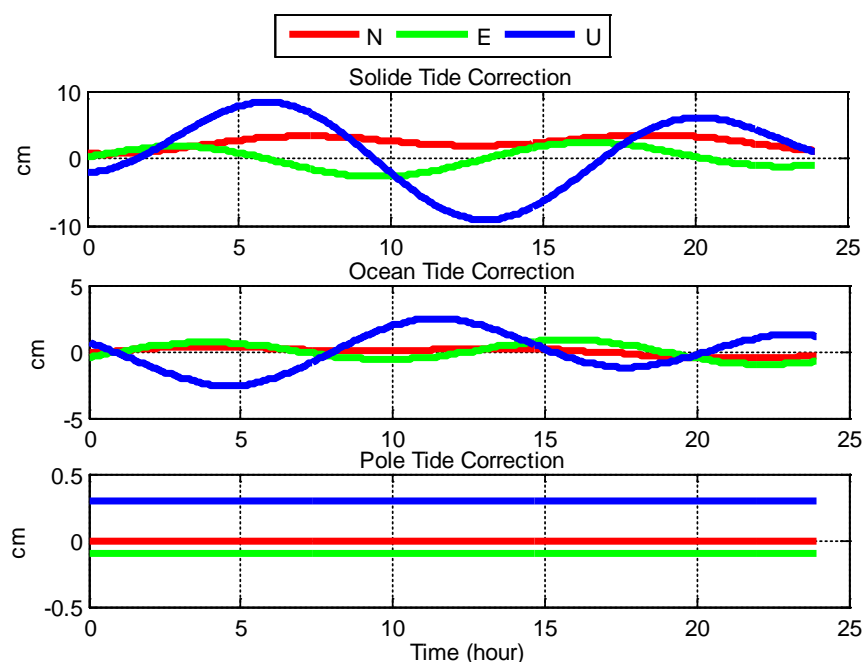


图 2.20 GMSD 站固体潮、海潮、极潮的变化

2.4 数据预处理

在 GNSS 数据处理时，数据质量控制是极为关键的一部分，尤其对于实时数据预处理。本节将对数据预处理质量控制中的实时周跳探测和相位平滑伪距进行分析。

2.4.1 实时周跳探测

由于信号的失锁和中断，会对相位产生周跳。对于涉及到相位观测值的数据处理，周跳探测是数据预处理中十分关键的一步。

2.4.1.1 双频周跳探测

对于双频数据，目前最常用的方法是 Blewitt 提出的 TurboEdit 周跳探测方法 (Blewitt, 1990)。TurboEdit 方法主要是利用双频数据构建 GF 和 MW 组合进行周跳探测。

(1) 基于 GF 组合的周跳探测

根据式(2.28)~(2.30)，双频伪距 GF 组合后，剩余部分为两个频点的电离层延迟差异和硬件延迟差异；双频相位 GF 组合后，剩余部分为两个频点的电离层延迟差异、双频模糊度差异及硬件延迟差（可被模糊度吸收）。如果历元间未发

生周跳，则历元间的 GF 组合差异即为双频电离层延迟的差异。由于伪距不含模糊度，因此其电离层延迟变化信息可以为相位信息利用。但根据表 2.4，伪距 GF 组合噪声约为 42cm，远大于相位观测值波长，为了减小伪距噪声的影响，可对伪距 GF 组合观测值进行 N 阶（ $N=\min[N/100+1,6]$ ）多项式拟合生成 Q。故 GF 组合探测周跳模型为：

$$\Delta L_{GF} = L_{GF} - Q = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2.71)$$

GF 组合周跳判断条件为：

$$|\Delta L_{GF}(i) - \Delta L_{GF}(i-1)| > 6 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) \quad (2.72)$$

$$|\Delta L_{GF}(i+1) - \Delta L_{GF}(i)| < 1 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) \quad (2.73)$$

若同满足(2.72)和(2.73)，则认为发生周跳；若只满足(2.72)，则认为是粗差。

(2) 基于 MW 组合的周跳探测

MW 组合的公式见式(2.37)，由于式(2.37)中硬件延迟差异几乎不变，历元间相位缠绕变化对周跳也可以忽略，因此 MW 组合周跳探测模型为：

$$N_{MW} = N_1 - N_2 = \Phi_1 - \Phi_2 - \frac{f_1 - f_2}{c \cdot (f_1 - f_2)} \cdot (f_1 P_1 + f_2 P_2) \quad (2.74)$$

N_{MW} 为宽巷模糊度，由于上式中含有伪距观测值，为了减小伪距的噪声影响，可以求多个历元的平均值 $\overline{N_{MW}}$ ，则 MW 组合周跳判断条件为：

$$|\overline{N_{MW}}(i-1) - N_{MW}(i)| > 4\sigma(i-1) \quad (2.75)$$

$$|N_{MW}(i+1) - N_{MW}(i)| < 1 \quad (2.76)$$

式中 σ 为前 i-1 个历元的 MW 组合的标准差。若同满足(2.75)和(2.76)，则认为发生周跳；若只满足(2.75)，则认为是粗差。

TurboEdit 方法即采用 GF 和 MW 组合进行综合判断，如果其中一个组合发生周跳，则认为发生了周跳。需要注意的是，GF 组合对 $[\lambda_1 \Delta N_1, \lambda_2 \Delta N_2]$ 组合的周跳不敏感，MW 组合则对 $[\Delta N_1, \Delta N_2]$ 组合的周跳不敏感。

但是 TurboEdit 方法中，无论是伪距还是相位，都利用了伪距观测值，虽然通过多项式拟合或多历元平均进行了一定消除，但仍然存在以下缺点：(1) 多项式拟合或多历元平均需要很多历元的数据，如 GF 组合中多项式拟合阶数至少是 6，需要几十甚至上百个历元的数据，这样对前期的数据无法准确进行周跳探测。(2) 卫星高度角较低时多路径误差及噪声较大，多项式拟合或多历元平均无法完全消除。以 GPS 为例，对于 GF 组合，只要这个误差超过 5.4cm⁷⁴，就无法探测出两个频点同时一周的周跳。(3) MW 组合中本历元的宽巷模糊度的计算利用了本历元的伪距观测值，很容易将伪距的噪声误判为周跳。以 GPS 为例，只要伪距组合后

⁷⁴ $\lambda_1 - \lambda_2 = -5.4cm$

的噪声超过 86cm，就无法探测出两个频点差一周的周跳。(4) 对于实时数据，无法获得下个历元的观测值，因此无法建立式(2.73)和(2.76)。

国内外许多研究和学者都对 TurboEdit 方法进行了改进。有提出对相位 GF 组合进行二次差分以消除电离层的影响，并对 MW 组合进行了向前向后平滑(Cai C, 2013)，但这种方法并不适用于实时周跳探测。也有提出利用电子含量变化率来衡量电离层延迟对周跳探测的影响(段荣, 2015)，其本质上和 GF 组合二次差分原理一致。也有对 MW 组合和 GF 组合的判断条件和阈值对 TurboEdit 方法进行改进(张小红, 2017)。也有对数据进行滑动窗口和依高度角定权(范世杰, 2016)。还有对相位 GF 组合进行多项式拟合，并在 TurboEdit 方法基础上增加星间差无电离层差分观测值的判断方法(吴继忠, 2011)，然而这种方法依赖于测站坐标，因此只适用于静态数据。

2.4.1.2 单频周跳探测

单频数据无法组成 GF、MW 等组合，因此无法使用 TurboEdit 方法探测周跳。目前常用的方法主要为多项式拟合，即利用相位数据进行多项式拟合探测周跳(罗峰, 2007; 蔡诗响, 2009)。然而这种方法中相位的变化无法确定是由于接收机的运动还是周跳造成的，因此只适用于规律运动或静态的接收机。也有提出利用星间单差观测值残差进行周跳探测(陈华, 2012)，这种方法同样依赖于测站坐标，只适用于静态数据。

为了消除几何运动状态的影响，通常采用单频伪距相位组合进行周跳探测(Subirana, 2013):

$$\Phi - P = 2 \frac{I}{f^2} + \lambda N - K + \varepsilon \quad (2.77)$$

上式中，K 为与伪距相位硬件延迟差异，一般变化非常小。

从上式可以看出，伪距相位组合除了包含模糊度，还包含电离层差异。由于电离层在一定时间内变化比较稳定，因此可以通过滑动多项式拟合来预报电离层误差。但这种方法受伪距噪声的影响很大，尤其是对于实时数据。因此对于规律运动或静态数据，一般结合相位观测值多项式拟合综合进行周跳探测。

2.4.2 实时相位平滑伪距

由式(2.13)和式(2.16)可知，GNSS 观测模型中未能模型化的误差主要有观测噪声和多路径误差。一般伪距相位的噪声为其波长的 1%，且为随机噪声。多路径误差则是由于信号反射造成的。一般相位的多路径误差不超过其波长的 1/4，但通常都小于 1cm。而伪距多路径误差理论上能达到其波长的 1.5 倍，即对于 P 码伪距，其多路径误差可达 45m(Subirana, 2013)。

对于坐标已知的长时间静态数据，由于卫星运动的周期性，多路径变化具有规律性，可以采用与卫星运动周期相关的恒星日滤波对伪距多路径进行平滑(殷海涛, 2011)。也有学者提出与卫星无关，只与卫星相对接收机的高度角及方位角相关的 MHM(Multipath Hemisphere Map)滤波方法(Dong D, 2016)。

对于坐标未知的伪距动态定位，为了减小伪距噪声和多路径误差，通常利用相位对伪距进行平滑。Bernese 中采用 RNXSMT 方法对伪距进行平滑，但这种方法只针对事后数据(Dach, 2015)。本小节介绍基于实时数据的双频和单频相位平滑伪距。

2.4.2.1 双频相位平滑伪距

(1) Hatch 滤波

Hatch 滤波是最常用的双频相位平滑伪距方法(Hatch, 1982), 其表达式为:

$$\begin{cases} \overline{P}_{IF}(t_1) = P_{IF}(t_1) \\ \overline{P}_{IF}(t_i) = \left(1 - \frac{1}{i}\right) \overline{P}_{IF}(t_{i-1}) + L_{IF}(t_i) - L_{IF}(t_{i-1}) + \frac{1}{i} P_{IF}(t_i) \end{cases} \quad (2.78)$$

由式中可以看出, 由于伪距相位电离层延迟相反的特性, 式中伪距相位均为无电离层组合观测值。若相位发生周跳, 则平滑过程重新初始化。

(2) CNMC 相位平滑伪距

针对单频数据的相位平滑伪距, Wu 等人提出了 CNMC(Code Noise and Multipath Correction)方法(Wu X, 2012)。CNMC 算法的计算方法如下:

以 L1 频点为例, 假设初始时刻的伪距多路径误差为 0, 根据式(2.13)和式(2.16), 包含 L1 相位模糊度、伪距多路径误差、伪距相位硬件延迟偏差、相位缠绕在内的偏差 CBias₁ 为:

$$CBias_1(t_1) = P_1(t_1) - L_1(t_1) - \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1(t_1) - L_2(t_1)) \quad (2.79)$$

若未发生周跳, 则 CBias₁ 可类似式(2.78)表达为:

$$CBias_1(t_i) = \frac{i-1}{i} CBias_1(t_{i-1}) + \frac{1}{i} \left[P_1(t_i) - L_1(t_i) - \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1(t_i) - L_2(t_i)) \right] \quad (2.80)$$

则伪距观测值可表达为:

$$\begin{cases} \overline{P}_1(t_1) = P_1(t_1) \\ \overline{P}_1(t_i) = L_1(t_i) + \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1(t_i) - L_2(t_i)) + CBias_1(t_i) \end{cases} \quad (2.81)$$

比较 Hatch 滤波和 CNMC, 可以发现 Hatch 滤波主要对双频无电离层组合伪距进行平滑, 而 CNMC 则可以分别对单频伪距进行平滑, 但 CNMC 仍然依赖于双频相位数据求得电离层延迟误差。相关文献表明, Hatch 滤波与 CNMC 本质上是等价的(常志巧, 2015)。

以 2016 年 1 月 1 日 ONSA 站的数据为例。分别利用 Hatch 滤波和 CNMC 算法进行相位平滑伪距, 并进行双频无电离层组合伪距单点定位, 将其与原始伪距的定位结果进行比较。图 2.21 为原始伪距、Hatch 滤波和 CNMC 算法的 G02 卫星伪距观测值残差 OMC(Observation Minuse Correction)的比较结果, 可以看到两种相位平滑伪距方法都能大大减小观测值噪声, 且两种方法结果等价。图 2.22 给出了原始伪距和 CNMC 伪距定位在 N、E、U 三个方向的定位误差 (Hatch 滤波结果与 CNMC 结果相同), 可以看到平滑后的定位结果噪声大大减小, 定位误差也从 [1.44, 0.86, 2.58]m 减小至 [0.62, 0.41, 1.25]m。

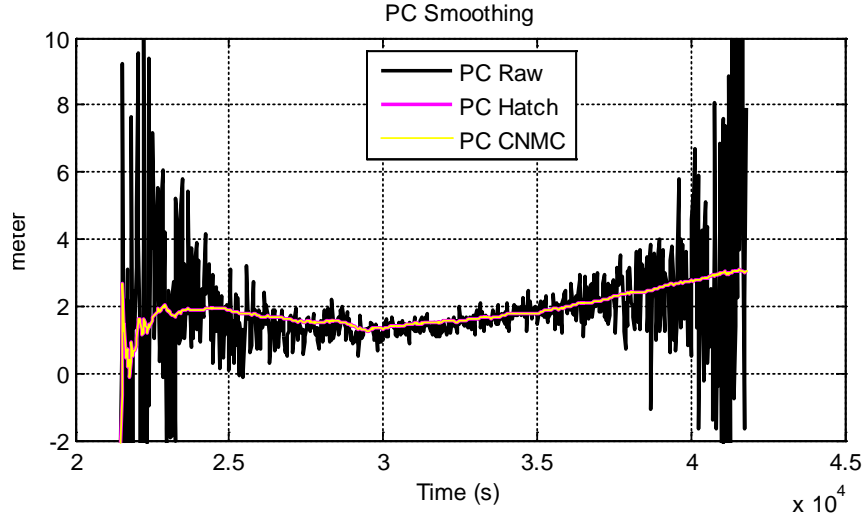


图 2.21 ONSA 站 G02 卫星不同相位平滑伪距方法的 OMC

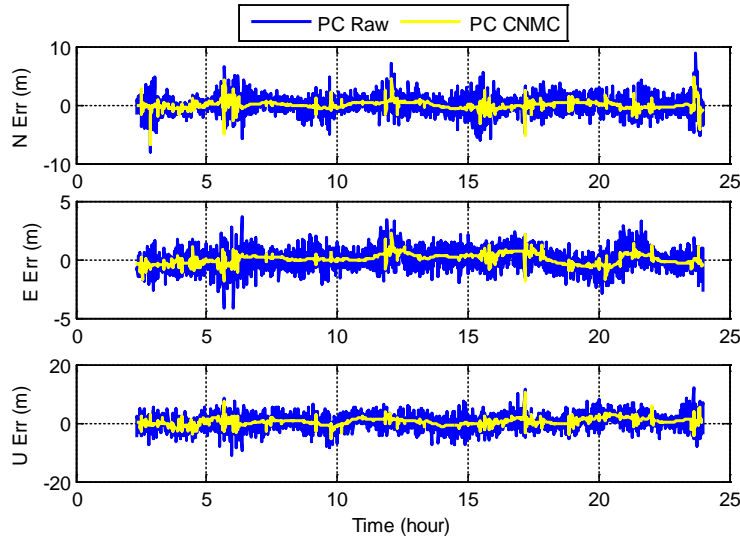


图 2.22 原始伪距与 CNMC 伪距双频定位结果 (原始 RMS: N=1.44m, E=0.86m, U=2.58m; CNMC RMS: N=0.62m, E=0.41m, U=1.25m)

2.4.2.2 单频相位平滑伪距

单频伪距相位平滑伪距也可以采用 CNMC 方法,但是这种方法仍然需要双频相位观测值,实际上并不是真正意义上的单频相位平滑伪距。对于单频伪距相位数据,可采用 Divergence-Free Smoother 平滑方法(Subirana, 2013)。

由于伪距与相位电离层延迟影响相反,当电离层在一定时间内变化比较稳定时,与多历元平均的结果差异很小,因此可以在滑动时间窗口内利用历元间相位的变化对伪距进行平滑。仿照式(2.78),以 L1 频点伪距相位为例,有:

$$\begin{cases} \bar{P}_1(t_i) = P_1(t_i) \\ \bar{P}_1(t_i) = \left(1 - \frac{1}{i}\right)(\bar{P}_1(t_{i-1}) + L_1(t_i) - L_1(t_{i-1})) + \frac{1}{i}P_1(t_i) \end{cases} \quad (2.82)$$

上式中,滑动时间窗口可以根据经验进行设置,一般数据采样率越高,窗口

时间可以设置越小。

图 2.23 为 ONSA 站 P1 单频采用原始伪距 (P1 Raw)、Convergence-Free Smoother 1800 秒平滑窗口 (P1 Smooth 1800s)、Convergence-Free Smoother 300 秒平滑窗口 (P1 Smooth 300s)、CNMC 平滑方法的 G02 卫星的伪距观测值残差 OMC 及其电离层延迟变化, 其中电离层模型采用 IGS 事后 GIM 模型。可以看到 CNMC 方法由于不受电离层延迟的影响, 最接近真实 OMC。当电离层延迟变化较稳定时, 两种 Convergence-Free Smoother 方法都能取得较好的效果。由于 1800s 时间大大平滑了伪距噪声, 因此 P1 Smooth 1800s 较 300s 的 OMC 变化更稳定, 也更接近 CNMC 方法。但当电离层变化较大时, 电离层延迟与多历元平均结果差异较大, P1 Smooth 1800s 的 OMC 出现发散, 而 P1 Smooth 300s 仍然接近真实 OMC。可见合适的滑动时间窗口对单频相位平滑伪距的影响很大。

图 2.24 和表 2.5 给出了这四种方法的定位结果比较。与图 2.23 类似, CNMC 的定位效果最好, 甚至优于双频相位平滑伪距的定位结果, 这是因为双频伪距无电离层组合放大了观测值噪声。而 Convergence-Free Smoother 方法中 P1 Smooth 300s 较 P1 Smooth 1800s 更接近 CNMC 的结果, P1 Smooth 1800s 在某些时段定位结果出现偏差。但总体上, 不同的单频相位平滑伪距定位结果都较原始单频伪距有改善。

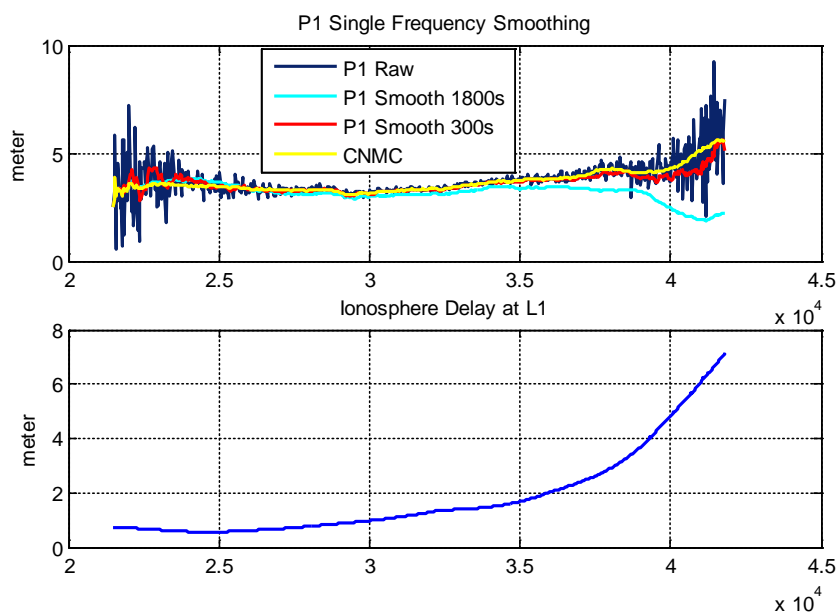


图 2.23 ONSA 站 G02 卫星不同单频相位平滑伪距方法的 OMC (上图) 及电离层变化 (下图)

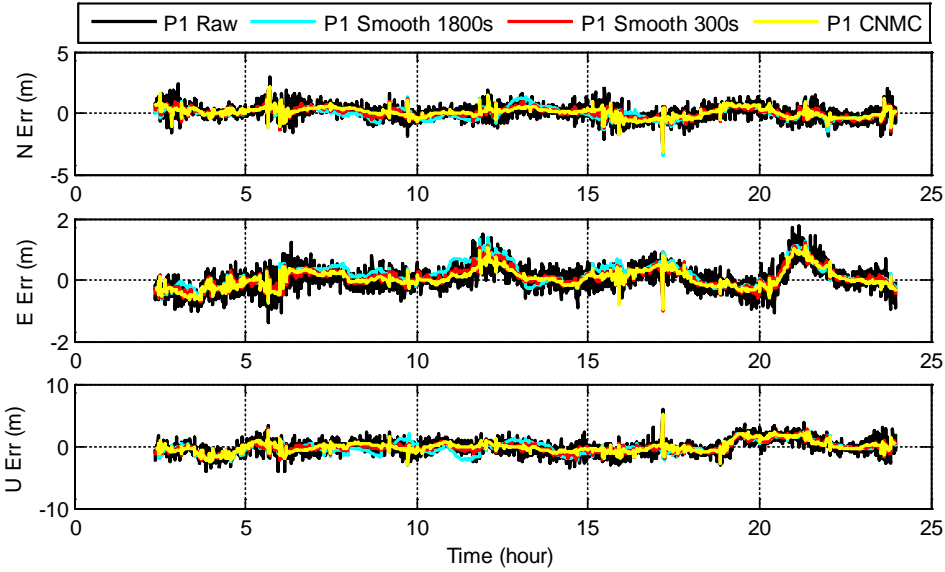


图 2.24 原始单频伪距与不同单频相位平滑伪距方法定位结果比较

表 2.5 几种单频相位平滑伪距的效果

方向	P1 Raw	P1 Smooth 1800s	P1 Smooth 300s	P1 CNMC
N(m)	0.57	0.45	0.39	0.37
E(m)	0.39	0.39	0.32	0.30
U(m)	1.15	1.01	0.87	0.87

2.5 GNSS 定位模型参数估计

前面几节介绍了 GNSS 观测模型及其线性组合,分析了各个误差改正模型及数据预处理策略。本节在此基础上进一步介绍 GNSS 定位模型及参数估计方法。

2.5.1 定位函数模型及随机模型

(1) 伪距单点定位

对于某个历元,当接收机观测到至少 4 颗卫星时,就可以进行伪距单点定位。以双频无电离层组合为例,对每颗卫星,都可建立形如式(2.23)的伪距观测方程。式中,卫星坐标和钟差可以通过广播星历或精密星历进行改正(见 2.3.1);钟差相对论改正可按照 2.3.2 节中的公式进行改正(对于伪距定位,距离相对论改正可以忽略);由于对流层模型精度一般在 1 分米以内,因此伪距定位时对流层延迟可直接适用模型改正而无需对其湿延迟进行参数估计;其他误差诸如卫星 TGD 误差(使用北斗广播星历或其他频点组合时)、PCO/PCV 误差(使用精密星历时)、地球形变误差,可根据 2.3 节介绍的方法进行相应改正。这样,伪距观测方程中的未知参数为接收机坐标 $[x, y, z]$ 和接收机钟差 $c \cdot \delta t$ 。

对式(2.42)在其近似坐标 $[x_0, y_0, z_0]$ 处进行线性化,有:

$$\rho = \rho_0 + \frac{x_0 - x^{\text{sat}}}{\rho_0} dx + \frac{y_0 - y^{\text{sat}}}{\rho_0} dy + \frac{z_0 - z^{\text{sat}}}{\rho_0} dz \quad (2.83)$$

上式中, $[x^{\text{sat}}, y^{\text{sat}}, z^{\text{sat}}]$ 为卫星坐标, ρ_0 为卫星至接收机近似坐标的几何距离。

这样, 对同一个历元的所有卫星, 可以建立形如下式的定位模型:

$$\begin{bmatrix} P_1 - \rho_1 - D_1 \\ \vdots \\ P_n - \rho_n - D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_0 - x^1}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^1}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^1}{\rho_0} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^n}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^n}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^n}{\rho_0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ c \cdot \delta t \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

上式中, $D = c \cdot \delta t^s + \Delta_{\text{rela}} - T$ 。

这样, 接收机平差后的接收机坐标为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

若接收机近似坐标与实际坐标相差太远 (如 1km 以上), 由于坐标线性化时舍弃的二次项误差的影响, 需要对接收机坐标进行迭代。但一般通过 Bancroft 算法(Bancroft, 1985)得到的近似坐标误差在 100m 以内, 因此可以不用进行迭代。

(2) 精密单点定位

对于高精度定位, 需利用相位观测值, 相位观测模型见 2.2 节。以双频无电离层组合为例, 可以建立形如式(2.23)和式(2.24)的伪距相位观测方程。其中对流层模型精度虽然在 4~7cm, 但仍然无法满足毫米级精密单点定位的需求, 因此还需对对流层天顶湿延迟进行参数估计。同时, 相位观测值相比伪距观测值, 还需增加相位模糊度参数(Kouba, 2015)。与式(2.84)类似, 精密单点定位模型为:

$$\begin{bmatrix} P_1 - \rho_1 - D_{P1} \\ L_1 - \rho_1 - D_{L1} \\ \vdots \\ P_n - \rho_n - D_{Pn} \\ L_n - \rho_n - D_{Ln} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_0 - x^1}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^1}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^1}{\rho_0} & 1 & M_{\text{wet}}^1 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{x_0 - x^1}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^1}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^1}{\rho_0} & 1 & M_{\text{wet}}^1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^n}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^n}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^n}{\rho_0} & 1 & M_{\text{wet}}^n & 0 & \dots & 0 \\ \frac{x_0 - x^n}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^n}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^n}{\rho_0} & 1 & M_{\text{wet}}^n & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ c \cdot \delta t \\ dZTD_w \\ B_1 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

式中, M_{wet} 为对流层湿延迟映射函数, $dZTD_w$ 为对流层天顶湿延迟改正参数, B 为以距离为单位的相位模糊度参数。

对于多系统 GNSS 定位,不同系统的接收机钟差和硬件延迟不一致,需对每个系统的钟差分别进行估计。由于不同系统的钟差差异一般较稳定,因此通常在估计某一系统钟差的时候同时估计系统偏差(Inter System Bias, ISB)参数(Pei X, 2012; Cai C, 2013; Zhang Y, 2014; Li X, 2014)。对于 GLONASS,其不同频率上的钟差还存在偏差(Inter Frequency Bias, IFB),最大可达 25ns,因此还需对 GLONASS 按照频率估计 IFB 参数(Defraigne, 2011; Wanninger, 2012; Chen J, 2013)。

无论是伪距单点定位还是精密单点定位,其定位模型都可以简化为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{x} \quad (2.87)$$

其中, \mathbf{y} 为观测值残差 (Observation Minus Correction, OMC), \mathbf{G} 为根据卫星、接收近似坐标、对流层湿延迟映射函数形成的设计矩阵, \mathbf{x} 为包括接收机坐标改正、钟差改正等其他参数在内的待估参数。

另外,在式(2.84)和式(2.85)中,不同观测方程的精度并不一致,因此需要对观测方程进行定权,建立其随机模型。观测方程噪声主要由各个模型的误差组成:

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{UERE}}^2 = \sigma_{\text{eph}}^2 + \sigma_{\text{clk}}^2 + \sigma_{\text{ion}}^2 + \sigma_{\text{trop}}^2 + \sigma_{\text{mp}}^2 + \sigma_{\text{noise}}^2 \quad (2.88)$$

上式中, σ 为观测方程噪声, σ_{UERE} 为用户等效距离误差(User Equivalence Range Error, UERE), σ_{eph} 、 σ_{clk} 、 σ_{ion} 、 σ_{trop} 、 σ_{mp} 、 σ_{noise} 分别表示卫星轨道精度、卫星钟差精度、电离层模型精度、对流层模型精度、多路径模型精度、观测值噪声的精度。其中 σ_{eph} 和 σ_{clk} 在使用广播星历和精密星历时精度并不一样(见 2.3.1); 对于 σ_{ion} 当使用无电离层组合或 GRAPHIC 组合时可不考虑; 对于 σ_{trop} , 当估计对流层湿延迟参数时可不用考虑; σ_{mp} 和 σ_{noise} 对伪距和相位并不一致,一般伪距相位观测值的精度为其波长大的 1%。以 GPS 为例,其 P 码伪距观测值精度为 0.3m, 相位观测值精度为 2mm。为了简化模型,可以将观测方程分为与高度角无关和高度角相关的部分:

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{SISURE}}^2 + \sigma^2(\text{ele}) = \sigma_{\text{eph}}^2 + \sigma_{\text{clk}}^2 + \sigma^2(\text{ele}) \quad (2.89)$$

上式中, σ_{SISURE} 为 GNSS 空间信号精度(Singal In Space User Range Error, SISURE), 主要由卫星轨道和钟差误差组成。第四章将对各系统的广播星历空间信号精度进行评估。 $\sigma^2(\text{ele})$ 一般按照高度角进行定权:

$$\begin{cases} \sigma(\text{ele}) = \sigma_0, & \text{if } \text{ele} > 30^\circ \\ \sigma(\text{ele}) = \frac{\sigma_0}{2\sin(\text{ele})}, & \text{else} \end{cases} \quad (2.90)$$

上式中，对于无电离层组合， σ_0 对于伪距观测值一般取 1m，对相位观测值一般取 1cm。对于 GRAPHIC 组合， σ_0 一般取 0.5m。

这样，式(2.87)中的随机模型为：

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & & \\ & \ddots & \\ & & \frac{1}{\sigma_n^2} \end{bmatrix} \quad (2.91)$$

式中， \mathbf{W} 为观测值权阵， \mathbf{R} 为观测值的协方差阵。

2.5.2 最小二乘

根据式(2.87)和式(2.91)，可建立 GNSS 定位的数学模型：

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad \mathbf{R} \quad (2.92)$$

其中 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 满足 $E[\boldsymbol{\varepsilon}] = 0$ 及 $\mathbf{R} = E[\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}^T]$ 。

根据最小二乘原理（王穗辉, 2015），可以建立估计参数的法方程：

$$(\mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G}) \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \quad (2.93)$$

基于上式，可得到上式的最小二乘最优无偏解：

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}} &= (\mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \\ \mathbf{P} &= (\mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \end{aligned} \quad (2.94)$$

式中 \mathbf{P} 为参数的协方差阵，一般为对称正定矩阵。对称正定矩阵可以采用基于 Cholesky 分解（平方根法）的方法求逆(同济大学, 2004)。

若有两组观测方程，包含部分或全部相同的未知参数，可以采用序贯平差对参数进行进行处理。设这两组观测方程的数学模型为：

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_1 &= \mathbf{G}_1 \mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}_1, & \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{y}_2 &= \mathbf{G}_2 \mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}_2, & \mathbf{R}_2 \end{aligned} \quad (2.95)$$

与式(2.94)类似，其参数解为：

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}} &= [\mathbf{G}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{G}_2]^{-1} [\mathbf{G}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{y}_1 + \mathbf{G}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{y}_2] \\ \mathbf{P} &= [\mathbf{G}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{G}_2]^{-1} \end{aligned} \quad (2.96)$$

其递归算法为：

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_1 &= \mathbf{P}_1 \cdot [\mathbf{G}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{y}_1] \\ \mathbf{P}_1 &= [\mathbf{G}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{G}_1]^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_2 &= \mathbf{P}_2 \cdot [\mathbf{G}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{y}_1 + \mathbf{G}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{y}_2] \\ \mathbf{P}_2 &= [\mathbf{P}_1^{-1} + \mathbf{G}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{G}_2]^{-1}\end{aligned}\quad (2.97)$$

上式即为序贯平差的参数解。

需要注意的是，序贯平差中相同参数在每个历元的解并不相同，只有最后一个历元的解才是最终的解。序贯平差相比最小二乘平差的优点是在法方程中可以消去后续不再关心的参数，如 GNSS 定位中每个历元的接收机钟差，发生周跳后前面历元的相位模糊度等，因此大大减小了法方程矩阵的大小(杨元喜, 2006)。

GNSS 实时定位中采用序贯平差处理时，每个历元都要消去接收机钟差参数，发生周跳时需对模糊度参数进行消去，一般每隔 2 小时消去对流层参数。对于动态定位，可以在每个历元处理前消去原来的坐标参数。

另外，对于最小二乘或序贯平差，可以在平差前在法方程中增加一些先验约束信息：

$$\begin{aligned}\mathbf{y} &= \mathbf{G}\mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}, & \mathbf{R} \\ \boldsymbol{\lambda} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}_\lambda, & \mathbf{R}_\lambda\end{aligned}\quad (2.98)$$

上式中第二式即为先验约束信息，如对流层延迟可以根据对流层模型精度进行先验约束。其处理方法与序贯平差中式(2.97)类似。

2.5.3 Kalman 滤波

GNSS 定位中，更常用的是 Kalman 滤波。Kalman 滤波主要分为状态预测和参数更新两部分(杨元喜, 2006)。

对于第 $n-1$ 和第 n 历元，其参数和协方差的预测模型为：

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}^-(n) &= \boldsymbol{\Phi}(n-1)\hat{\mathbf{x}}^-(n-1) \\ \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- &= \boldsymbol{\Phi}(n-1)\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n-1)}^- \boldsymbol{\Phi}^T(n-1) + \mathbf{Q}(n-1)\end{aligned}\quad (2.99)$$

式中 $\boldsymbol{\Phi}$ 为参数状态转移矩阵， \mathbf{Q} 为过程噪声矩阵，通过 \mathbf{Q} 可以在观测方程中增加先验信息和未被模型化的误差。

预测模型和历元 n 的观测模型可以组成形如式(2.95)的观测模型：

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}^-(n) \\ \mathbf{y}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{G}(n) \end{bmatrix} \mathbf{x}(n), \quad \mathbf{P}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}(n) \end{bmatrix}\quad (2.100)$$

与序贯平差类似，上式的最小二乘解为：

$$\begin{aligned}\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)} &= \left[\left(\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \right)^{-1} + \mathbf{G}^T(n) \mathbf{R}^{-1}(n) \mathbf{G}(n) \right]^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}(n) &= \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)} \left[\left(\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \right)^{-1} \hat{\mathbf{x}}^-(n) + \mathbf{G}^T(n) \mathbf{R}^{-1}(n) \mathbf{y}(n) \right]\end{aligned}\quad (2.101)$$

可以看到 Kalman 滤波的公式和序贯平差除了过程噪声矩阵的差异外，其他方面几乎没有区别。而传统的 Kalman 滤波的公式为：

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)} &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}(n)\mathbf{G}(n)]\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \\ \hat{\mathbf{x}}(n) &= \hat{\mathbf{x}}^-(n) + \mathbf{K}(n)[\mathbf{y}(n) - \mathbf{G}(n)\hat{\mathbf{x}}^-(n)] \end{aligned} \quad (2.102)$$

其中 $\mathbf{K}(n)$ 为 Kalman 滤波的增益矩阵。

$$\mathbf{K}(n) = \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \mathbf{G}^T(n) [\mathbf{G}(n)\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \mathbf{G}^T(n) + \mathbf{R}(n)]^{-1} \quad (2.103)$$

下面证明式(2.101)与式(2.102)的等价性。先给出矩阵恒等变换公式(Bierman, 1976)：

$$\begin{aligned} (\mathbf{D} + \mathbf{ACB})^{-1} &= \mathbf{D}^{-1} - \mathbf{D}^{-1}\mathbf{A}(\mathbf{BD}^{-1}\mathbf{A} + \mathbf{C}^{-1})^{-1}\mathbf{BD}^{-1} \\ (\mathbf{BD}^{-1}\mathbf{A} + \mathbf{C}^{-1})^{-1}\mathbf{BD}^{-1} &= \mathbf{CB}(\mathbf{D} + \mathbf{ACB})^{-1} \end{aligned} \quad (2.104)$$

根据矩阵恒等变换，式(2.101)可改写为：

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(n) &= \left[(\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^-)^{-1} + \mathbf{G}^T(n)\mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{G}(n) \right]^{-1} \left[(\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^-)^{-1}\hat{\mathbf{x}}^-(n) + \mathbf{G}^T(n)\mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{y}(n) \right] \\ &= \left[\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- - \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \mathbf{G}^T(n) (\mathbf{G}(n)\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \mathbf{G}^T(n) + \mathbf{R}(n))^{-1} \mathbf{G}(n)\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \right] \left[(\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^-)^{-1}\hat{\mathbf{x}}^-(n) + \mathbf{G}^T(n)\mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{y}(n) \right] \\ &= \hat{\mathbf{x}}^-(n) - \mathbf{K}(n)\mathbf{G}(n)\hat{\mathbf{x}}^-(n) + \\ &\quad \left[\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- - \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \mathbf{G}^T(n)\mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{G}(n) (\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^-)^{-1} + \mathbf{G}^T(n)\mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{G}(n) \right]^{-1} \mathbf{G}^T(n)\mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{y}(n) \\ &= \hat{\mathbf{x}}^-(n) - \mathbf{K}(n)\mathbf{G}(n)\hat{\mathbf{x}}^-(n) + \\ &\quad \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \mathbf{G}^T(n) \left[\mathbf{R}^{-1}(n) - \mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{G}(n) (\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^-)^{-1} + \mathbf{G}^T(n)\mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{G}(n) \right]^{-1} \mathbf{G}^T(n)\mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{y}(n) \\ &= \hat{\mathbf{x}}^-(n) - \mathbf{K}(n)\mathbf{G}(n)\hat{\mathbf{x}}^-(n) + \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \mathbf{G}^T(n) [\mathbf{R}(n) + \mathbf{G}(n)\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \mathbf{G}^T(n)]^{-1} \mathbf{y}(n) \\ &= \hat{\mathbf{x}}^-(n) - \mathbf{K}(n)\mathbf{G}(n)\hat{\mathbf{x}}^-(n) + \mathbf{K}(n)\mathbf{y}(n) \\ &= \hat{\mathbf{x}}^-(n) + \mathbf{K}(n)[\mathbf{y}(n) - \mathbf{G}(n)\hat{\mathbf{x}}^-(n)] \end{aligned} \quad (2.105)$$

即证式(2.101)与式(2.102)等价，即基于序贯平差的 Kalman 滤波与传统 Kalman 滤波在本质上是一样的，二者的计算过程可用图 2.25 表示。

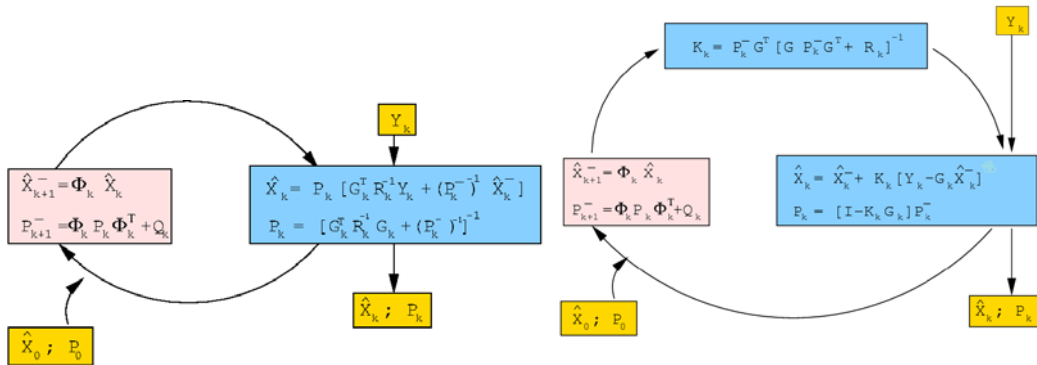


图 2.25 基于序贯平差的 Kalman 滤波与传统 Kalman 滤波计算流程

(http://www.navipedia.net/index.php/Kalman_Filter)

另外, GNSS 定轨定位中也常用到均方根滤波(Square Root Information Filter, SRIF)的方法 SRIF(Bierman, 1976; Wang T C, 1988; Campbell, 1998; 赵齐乐, 2006; Subirana, 2013), 其本质上与序贯平差和 Kalman 滤波等价(Bierman, 1976)。

Kalman 滤波中, 对于静态定位, 其坐标参数不变, 钟差参数为随机噪声模型, 对流层参数一般为随机游走模型, 未发生周跳时, 其模糊度参数不变, 故其包含的坐标、接收机钟差、对流层湿延迟和模糊度参数的状态转移矩阵 Φ 和过程噪声矩阵 Q 可定义为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 0 & \\ & & & & 1 \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ & 0 & & & & \\ & & 0 & & & \\ & & & \sigma_{\delta t}^2 & & \\ & & & & \sigma_{\text{trop}}^2 & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (2.106)$$

其中 $\sigma_{\delta t} = 1 \text{ ms} = 300 \text{ km}$, $\sigma_{\text{trop}}^2/t = 1 \text{ cm}^2/\text{h}$, 当相位发生周跳时, 状态转移矩阵中的系数为 0。

对于动态定位, 若其运动速度未知, 坐标参数为随机噪声模型, 其状态转移矩阵 Φ 和过程噪声矩阵 Q 可定义为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & 0 & & & \\ & & 0 & & \\ & & & 0 & \\ & & & & 1 \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} \sigma_{dx}^2 & & & & & \\ & \sigma_{dy}^2 & & & & \\ & & \sigma_{dz}^2 & & & \\ & & & \sigma_{\delta t}^2 & & \\ & & & & \sigma_{\text{trop}}^2 & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (2.107)$$

式中 $[\sigma_{dx} \quad \sigma_{dy} \quad \sigma_{dz}]$ 为坐标噪声, 对于高速运动物体, 可设置为 10km。

若运动速度确定, 则坐标参数可变为随机游走模型, 此时其状态转移矩阵 Φ 和过程噪声矩阵 Q 可定义为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 0 & \\ & & & & 1 \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} Q'_{dx}\Delta t & & & & & \\ & Q'_{dy}\Delta t & & & & \\ & & Q'_{dz}\Delta t & & & \\ & & & \sigma_{\delta t}^2 & & \\ & & & & \sigma_{\text{trop}}^2 & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (2.108)$$

$[Q'_{dx} \quad Q'_{dy} \quad Q'_{dz}]$ 为运动速度噪声。

对于静态或动态定位, 其先验信息可设置为:

$$\mathbf{Q}_0 = \begin{bmatrix} 1^2 \text{ km}^2 & & & & & \\ & 1^2 \text{ km}^2 & & & & \\ & & 1^2 \text{ km}^2 & & & \\ & & & 300^2 \text{ km}^2 & & \\ & & & & 0.1^2 \text{ m}^2 & \\ & & & & & 20^2 \text{ m}^2 \end{bmatrix} \quad (2.109)$$

另外,也有学者提出采用随机游走模型对接收机钟差进行估计(Wang K, 2013; 于合理, 2016),但是这种方式仅适用于频率稳定性较高的接收机钟。

2.6 本章小结

本章介绍了 GNSS 精密定位的相关理论。对各 GNSS 系统的时间和空间系统进行了详细介绍,并给出了不同系统之间的转换关系。给出了 GNSS 伪距和相位观测值的观测模型及不同形式的线性组合模型,并在此基础上详细介绍了 GNSS 观测模型中的各个误差及其改正模型。介绍了实时数据预处理中单频及双频周跳探测方法。介绍了单频和双频相位平滑伪距方法,给出了双频 CNMC 和 Hatch 滤波算法的公式及其平滑效果。介绍了单频 Divergence-Free Smoother 方法,并将其结果与单频 CNMC 算法比较,认为当平滑窗口时间较小时,能取得与 CNMC 相当的效果,若平滑窗口时间过长,可能会出现滤波发散。介绍了 GNSS 伪距定位和精密单点定位的函数模型及随机模型,给出了最小二乘、序贯平差、Kalman 滤波的公式,论证了三者的等价性,并介绍了 GNSS 定位时的参数设置。这些为后面的相关内容提供了理论基础和依据。

第 3 章 GNSS 精密单点定位性能评估及分析

根据上一章介绍的 GNSS 定位模型,可以对 GNSS 数据进行伪距和精密单点定位。目前许多离线或在线 GNSS 精密定位软件已经能达到静态 1~2cm 甚至毫米级,动态 5cm 以内的定位精度。随着 Galileo、BDS、QZSS 等系统的发展,多系统精密定位逐渐凸显出其优势,能兼容多系统定位也是 GNSS 定位软件的功能需求。另外,对于实时精密单点定位,其收敛时间对用户工作效率的影响十分重要。

本章在精密定位理论的基础上,利用 GNSS 多功能精密定位软件 Net_PPP 对目前精密单点定位的精度进行分析,并研究影响精密单点定位收敛时间的因素,进而对用户精密定位性能提升进行分析。

3.1 Net_PPP 及处理策略

目前已经有很多 GNSS 精密定位软件,其中离线后处理软件包括 Bernese((Dach, 2015)⁷⁵、GAMIT(Herring, 2006)⁷⁶、RTK_LIB(Takasu, 2010)⁷⁷、gLAB(Hernandez, 2010)⁷⁸、PANDA(Shi C, 2008; Li M, 2014)、LTW(王解先, 2011)等,这些软件静态定位的精度在 1~2cm 甚至 mm 级,IGS ACC 即采用 Bernese 对其快速和最终产品进行 PPP 验证,其精度在毫米级⁷⁹。另外也有很多在线 PPP 计算软件,如 JPL 的 APPS⁸⁰, NRC 的 CSRS-PPP(Tétreault, 2005)⁸¹, University of Brunswick 的 GAPS(Leandro, 2007)⁸², GMV 的 MagicGNSS(Piriz, 2008)⁸³, Geoscience Australia 的 AUSPOS⁸⁴, Trimble 的 RTX_PP(Doucet, 2012)⁸⁵等。其中 AUSPOS 和 PRX_PP 只能处理静态数据。研究表明 APPS、CSRS-PPP、GAPS、MagicGNSS 等在线软件的静态 PPP 精度在 1~2cm, 2 小时精度为 2~4cm(Guo Q, 2015; Malinowski, 2016)。作为商业化应用十分成功的全球实时和事后精密定位服务系统,CenterPoint RTX 基于 Trimble 全球分布的监测站进行实时定轨,其实时钟差采样率为 1Hz,能满足高频动态用户定位的需求(Leandro, 2011)。RTX_PP 采用 CenterPoint RTX 计算得到的实时精密轨道和钟差,通过固定非差模糊度进行精密单点定位,能在 15 分钟内将模糊度固定至整数解。其 30 分钟内静态定位精度为水平 1cm,高程 2cm,24 小时定位精度在 mm 级。其动态定位精度在 30 分钟内能达到水平 1.5cm,高程 2.5cm(Doucet, 2012)。

近年来许多学者都对 GNSS 单系统及多系统 PPP 结果进行了分析(Ge M, 2008; Seepersad, 2014; Li X, 2014; Lou Y, 2016; Choy, 2017; Kouba, 2015)。其中 Ge

⁷⁵ <http://www.bernese.unibe.ch/>

⁷⁶ <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/index.htm>

⁷⁷ <http://www.rtklib.com/>

⁷⁸ <http://www.gage.es/gLAB>

⁷⁹ http://acc.igs.org/index_igsacc_ppp.html

⁸⁰ http://apps.gdgps.net/apps_howtouse.php

⁸¹ <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/tools-applications/10925>

⁸² <http://gaps.gge.unb.ca/>

⁸³ <https://magicgnss.gmv.com/ppp>

⁸⁴ <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>

⁸⁵ <http://www.trimblertx.com>

对结果采用了 Helmert 参数转换;Li 对 2013 年 MGEX 和 BETN 结果进行了分析;Lou 只对动态定位结果进行了分析,且只有一天的数据;Seepersad 则对 2012 年共 7 天约 300 个 IGS 站的数据进行了分析,具有一定的代表性;Kouba 分别使用 GIPSY、Bernese 和 GPS Pace 对 IGS 不同分析中心的产品进行了定位验证,其中最近一次的结果为采用 GPS Pace 对 2009 年 1 月 25 日至 31 日共 7 天 36 个 IGS 站的数据进行定位(Kouba, 2015)。

为了研究影响 GNSS 精密定位的收敛性和定位精度,本文开发了 GNSS 多功能精密定位软件 Net_PPP。

3.1.1 Net_PPP

Net_PPP 中各项参数及算法遵循各系统和 IGS 定义的框架及标准,能实现 GPS、GLONASS、Galileo、BDS、IRNSS、QZSS 等系统的伪距单点定位及精密单点定位,也能基于钟差或轨道改正信息进行定位,可以对区域或全球网进行钟差估计及坐标解算,也可以实现基于伪距或相位观测值的原子钟时间传递。

在本章的精密单点定位实验中,Net_PPP 的配置参数见表 3.1。

表 3.1 Net_PPP 精密单点定位配置参数

类别	滤波器	卡尔曼滤波
模型改正	观测值	GPS: L1&L2, GLONASS: L1&L2, BDS: B1&B2, Galileo: E1&E5a
	数据采样率	30s
	截止高度角	10°
	观测值权重	高度角定权
	观测噪声	相位 1cm; 伪距 1m
	卫星轨道	固定为 IGS 精密轨道(Kouba, 2015)
	卫星钟差	固定为 IGS 精密钟差(Kouba, 2015)
	相位缠绕	模型改正(Wu J T, 1991)
	地球形变改正	IERS 协议(IERS Conventions 2010)
	天线相位改正	igs08.atx
	电离层改正	无电离层组合
	对流层改正	初值: GPT2w+SAAS+VMF1(Boehm, 2015), 湿延迟剩余部分作为参数估计
估计参数	测站坐标	静态: 常数; 动态: 白噪声。先验信息: 10km
	测站钟差	白噪声, 先验信息: 1ms
	对流层天顶湿延迟	随机游走, 1cm/sqrt(h), 先验信息: 0.1m
	模糊度	分段常数, 浮点解, 先验信息: 20m
	系统偏差	常数

高度角定权方案按照公式(2.90)确定,由于北斗 GEO 卫星轨道钟差精度较差(Jean Y, 2016),在高度角定权的基础上对其进行降权处理。

3.1.2 数据及产品介绍

为了进行验证,每隔 30 天选取全球分布的共 49 个 MGEX 监测站数据,时间跨度为 2014 年 1 月至 2017 年 1 月, MGEX 监测站的分布见图 3.1。这些监测站全部具备接收 GPS+GLONASS+Galileo+BDS 数据的功能,由于目前 BDS 还是区域性卫星导航系统,在非亚太地区只能观测到部分北斗卫星。

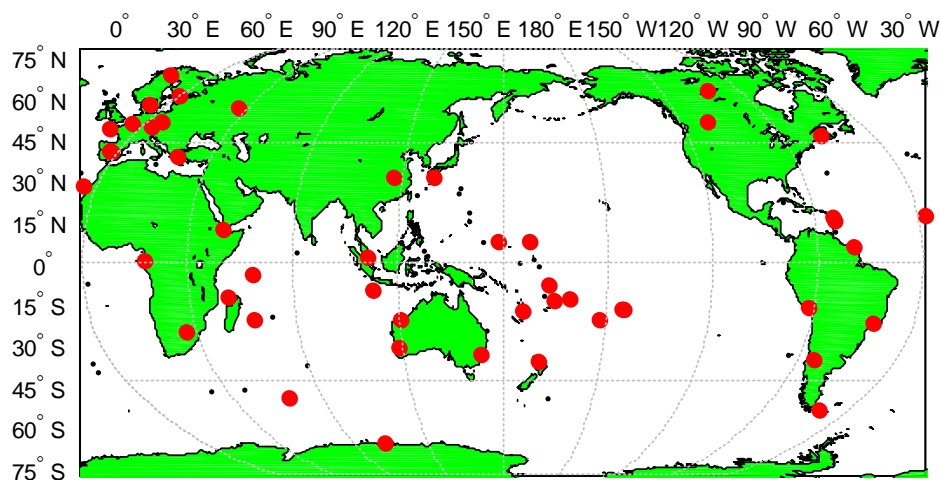


图 3.1 MGEX 监测站分布 (共 49 个站, 数据跨度 2014 年 1 月~2017 年 1 月)

目前IGS提供的精密星历和轨道产品包括事后(Final)、快速(Rapid)、超快速(Ultra-Rapid)和实时(RTS)产品, IGS最终精密轨道和钟差由COD(Center for Orbit Determination in Europe, Switzerland)、EMR(Natural Resources Canada)、ESA(European Space Agency)、GFZ(GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany)、GRG(Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS)/Centre National d'Etudes Spatiales (CNES))、JPL(Jet Propulsion Laboratory, U.S.A.)、MIT(Massachusetts Institute of Technology, U.S.A.)、NGS(National Geodetic Survey, NOAA, U.S.A.)、SIO(Scripps Institute of Oceanography, U.S.A.)共 9 个分析中心(Analysis Center, AC)的产品综合而成。各个分析中心的产品分别采用不同的软件(Bernese, GAMIT, GIPSY, NAPEOS, EPOS, PAGES, GINS/Dynamo)经定轨定位生成(Kouba, 2015)。IGS事后产品一般延迟 13 天发布⁸⁶, 而IGR(IGS Rapid)则延迟 17 小时发布。IGR由COD、EMR、ESA、GFZ、JPL、NGS、SIO、USN(United States Naval Observatory, U.S.A.)、WHU(Wuhan University, China)等 9 个分析中心的快速产品综合而成。为了满足准实时定位的需求,从 2000 年起,IGS开始每隔 6 小时发布 IGU(IGS Ultra-Rapid)产品, IGU一般延迟 3 小时,由 24 小时观测部分(Observed-half)和 24 小时预报部分(Predicted-half)能组成。根据IGS-RTPP 计划,IGS从 2013 年 4 月开始提供实时轨道和钟差改正服务(RTS)。

图 3.2 和 3.3 为 1994 年至 2017 年 3 月各分析中心和IGR与IGS事后轨道钟差的差异⁸⁷。可以看到在 20 多年时间里,各分析中心的轨道与IGS事后轨道的差异

⁸⁶ <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/>

⁸⁷ <http://acc.igs.org/>

由 30cm 提高至目前的 1~2cm, 这主要是因为各分析中心的框架实现与 IGS 事后产品越来越接近, 其 Helmert 框架转化参数越来越小⁸⁸。各分析中心钟差与 IGS 事后钟差差异在 0.1~0.2ns 之间, 若扣除各卫星钟差的系统偏差, 其 STD 甚至达到 0.01~0.02ns, 见图 3.4。实际上, 钟差系统偏差部分在精密定位中可以被相位模糊度吸收而不影响最终定位结果。同时, 也可以看到 IGR 轨道和钟差精度并不差于其他各分析中心。

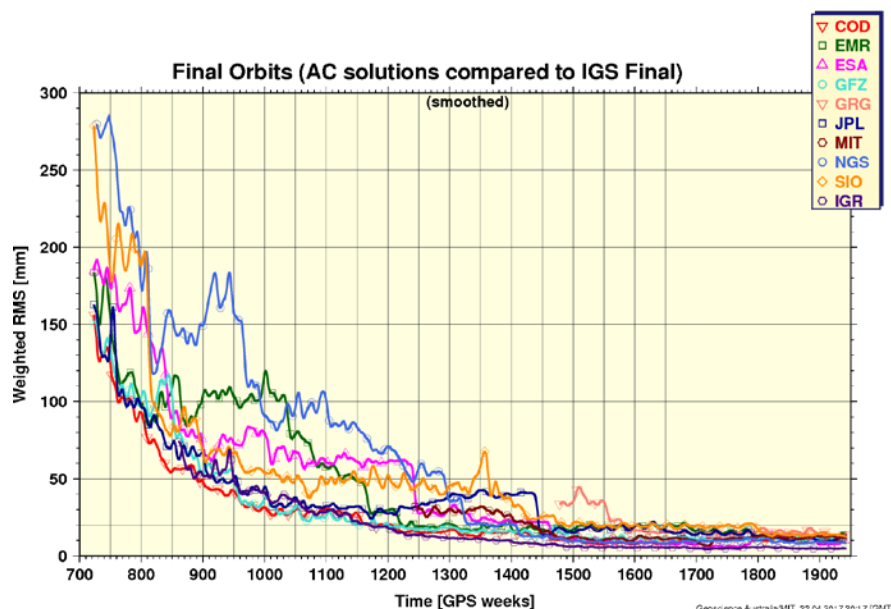


图 3.2 各分析中心及 IGR 轨道与 IGS 事后轨道的差异(<http://acc.igs.org/>)

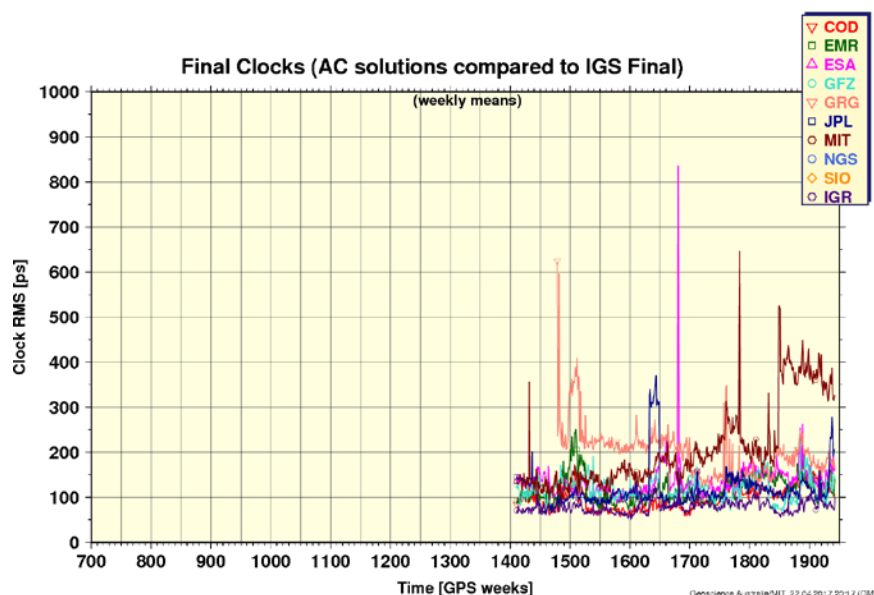


图 3.3 各分析中心及 IGR 钟差与 IGS 事后钟差的差异(<http://acc.igs.org/>)

⁸⁸ <http://acc.igs.org/>

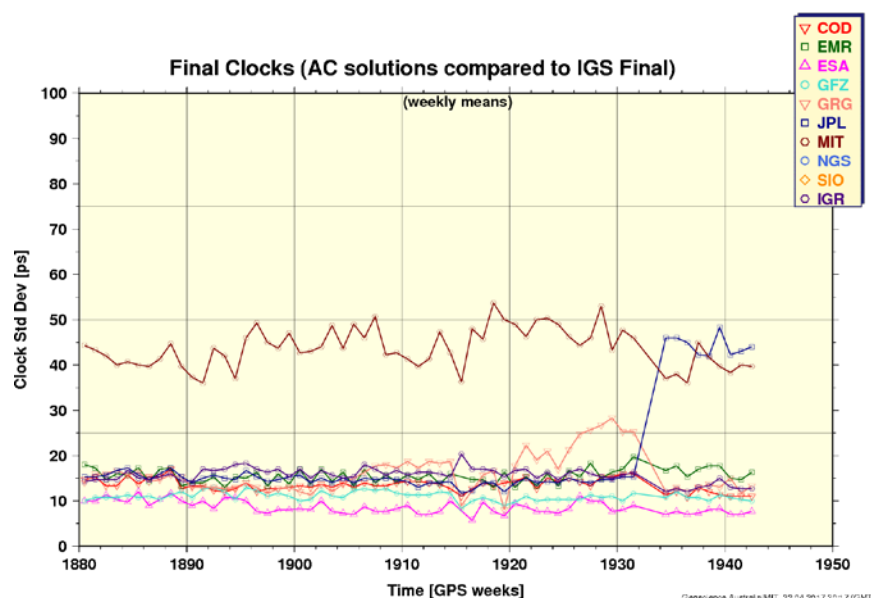


图 3.4 各分析中心及 IGR 钟差与 IGS 事后钟差扣除均值后的差异(<http://acc.igs.org/>)

从 2011 年 IGS 提出 MGEX 计划开始, 不同分析中心也开始提供 MGEX 轨道和钟差产品⁸⁹。图 3.5 为 2012 年至 2017 年 1 月各分析中心的 MGEX 轨道钟差中包含的 GNSS 系统。可以看到, 目前只有 GBM(GFZ)、COM(COD)、WUM(WHU) 提供北斗轨道和钟差, 其中 COM 产品中不包含北斗 GEO 卫星轨道和钟差。

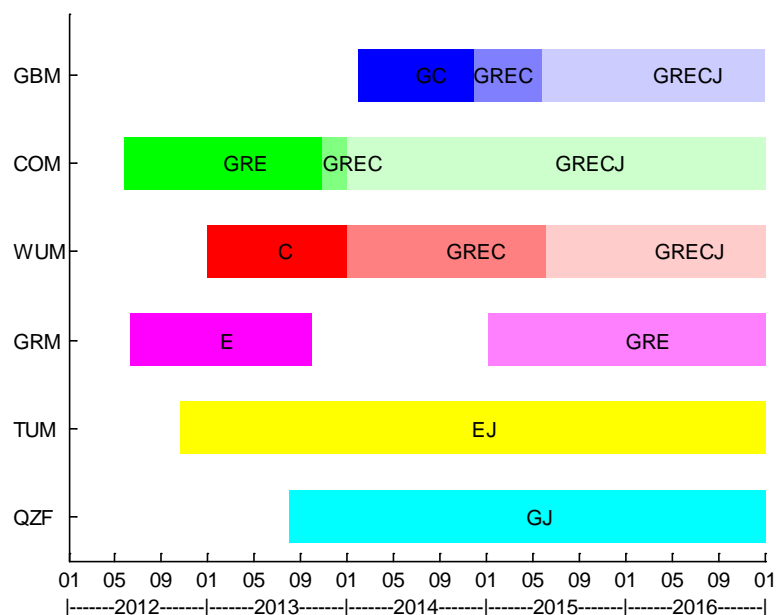


图 3.5 2012 年至今各分析中心的 MGEX 轨道钟差状态

需要注意的是, 目前提供北斗精密轨道钟差的三个分析中心里, GBM 和 WUM 的卫星姿态对 IGSO 和 MEO 卫星按照太阳与卫星轨道面夹角小于 4° 时调

⁸⁹ <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex/>

整为零偏模式，而 COM 产品仍作为动偏进行处理，在定位时使用不同分析中心产品时应与其卫星姿态处理模式保持一致。

3.2 PPP 定位性能评价

使用 Net_PPP 对近三年的 MGEX 数据分别进行静态和动态处理。为了验证 Net_PPP 软件的定位性能，采用 IGS 提供的各分析中心及综合后的最终轨道和钟差产品，将定位结果与 IGS 提供的 SNX 文件中的坐标进行对比，每个站每天的结果作为一个样本，共约 1300 个样本，对其结果进行统计。

3.2.1 静态 PPP

采用 IGS 事后轨道和钟差对 3.1.2 中的 GPS 数据进行定位（如未特别说明，后续结果均为采用 IGS 事后轨道和钟差的 GPS 定位结果），取每天静态 PPP 最后一个历元的定位结果作为静态定位结果，所有站所有天在三个方向上的定位误差分布见图 3.6，其各个方向及平面、三维上的 RMS、STD、均值及最大值的统计见表 3.2。

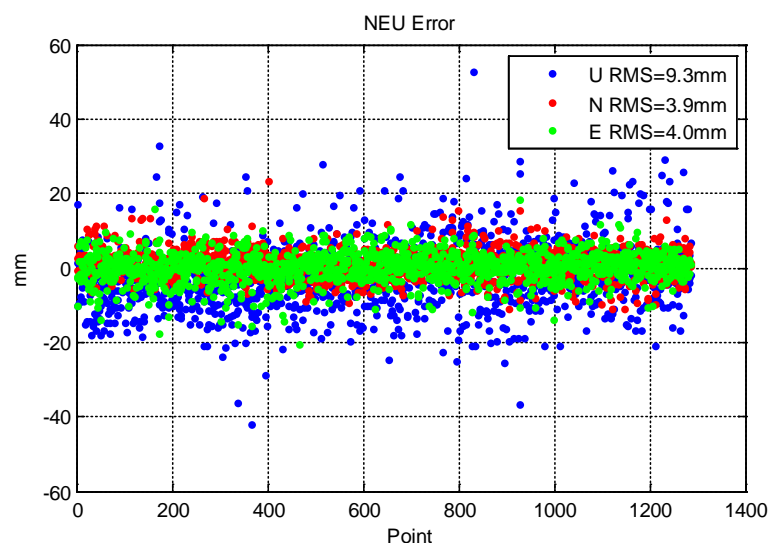


图 3.6 静态 GPS PPP 定位误差

表 3.2 静态 GPS PPP 各方向上的定位精度统计（单位：毫米）

方向	RMS	STD	Mean	Max
N	3.9	3.8	1.0	23.3
E	4.0	4.0	0.2	20.3
U	9.3	9.1	-1.9	54.0
平面	5.6	5.5	Nan	23.5
三维	10.9	10.7	Nan	55.3

由图表中可以看出，Net_PPP 静态 PPP 结果在 N、E、U 三个方向上的定位

精度分别为 3.9mm、4.0mm、9.3mm, Seepersad 的统计结果为 5mm、6mm、13mm(Seepersad, 2014), GPS Pace 的定位精度则为 3mm、5mm、14mm(Kouba, 2015), 可见 Net_PPP 与这二者相比精度略有提高。均值误差在 2mm 以内, 不存在较大的系统误差。三维坐标误差为 1.09cm, 可见静态 PPP 的精度可以达到 1cm。最大误差在水平方向上不超过 3cm, 高程方向上不超过 6cm。

为进一步分析静态 PPP 的定位误差分布, 将其定位误差按照每隔 2mm 统计其分布的百分比, 图 3.7 为平面和高程误差的分布情况。可以看到, 93%的平面误差在 1cm 以内, 97%的高程误差在 2cm 以内。

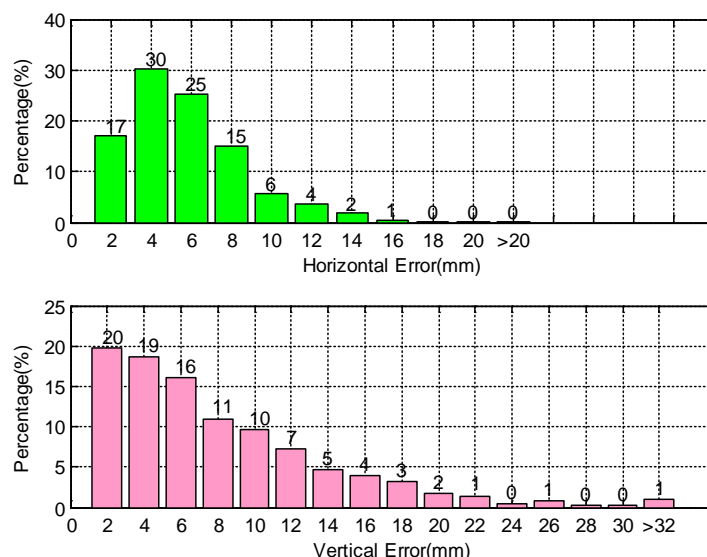


图 3.7 静态 GPS PPP 定位误差分布直方图 (上子图: 水平; 下子图: 高程)

为分析不同分析中心的产品对定位结果的影响, 分别采用 COD、ESA、GFZ、IGR、IGS 的轨道钟差对 3.1.2 中的数据进行静态 GPS PPP。同时, 为了检验 MGEX 产品的精度, 增加 GBM、COM 轨道钟差。需要注意的是, IGS、COD、ESA、GFZ 的钟差采样率均为 30s, COM 和 IGR 钟差的采样率为 5min, 而 GBM 钟差采样率从 2015 年 5 月开始由 5min 变为 30s, 因此将 GBM 结果分为 30s 和 5min 两部分, 分别用 GBM1 和 GBM2 表示。

由于各分析中心的框架实现与 SNX 文件提供的坐标框架可能存在差异, 因此对各分析中心每天的定位结果进行 Helmert7 参数转换。这几种模式的静态 GPS PPP 结果见图 3.8, 其中上子图为未作参数转换的结果统计, 下子图为进行 Helmert 参数转换后的统计结果。

由图可知, COD、ESA、GFZ、GBM1 的结果与 IGS 事后精密星历的结果差异很小, 最大不超过 1mm。与(Kouba, 2015)的结果相比, 在高程上从约 14mm 提高至 9.3mm 左右。一方面可能是由于(Kouba, 2015)的结果是 2009 年的数据, 其框架实现是 ITRF2005, 而本文中各分析中心均采用 ITRF2008 框架, 各分析中心间的框架和基准差异越来越小。另外也说明从 2009 年到 2016 年间, IGS 各分析中心的轨道和钟差精度越来越高。

对于 GBM2、COD 和 IGR, 其精度在高程方向上降低了约 3mm, 这主要是由于其钟差采样率为 5min, 而本文数据采样率为 30s, 在进行钟差内插时会造成精度损失。Bock 指出, 当卫星钟差采样率达到 5s 以上时, 进行钟差内插才不影响其精度(Bock, 2009)。另外可以发现, IGR 的结果与其他各分析中心的结果差

异非常小，这也反映了图 3.2 和图 3.3 中 IGR 轨道和钟差的精度水平。

同时可以看到，Helmert参数转换之前，各分析中心的结果与IGS事后产品的结果在N和U方向存在最大约 1mm的差异，进行Helmert参数转换后，30s钟差采样率下各分析中心的精度几乎相同，在高程上精度约为 8.5mm，且与(Kouba, 2015)的结果在同一水平。另外，IGS每天在其分析中心网站上使用Bernese和各分析中心的事后和实时产品对约 100 个监测站进行静态GPS PPP，并计算其Helmert参数转化后的定位结果⁹⁰，其结果与本文结果相近。

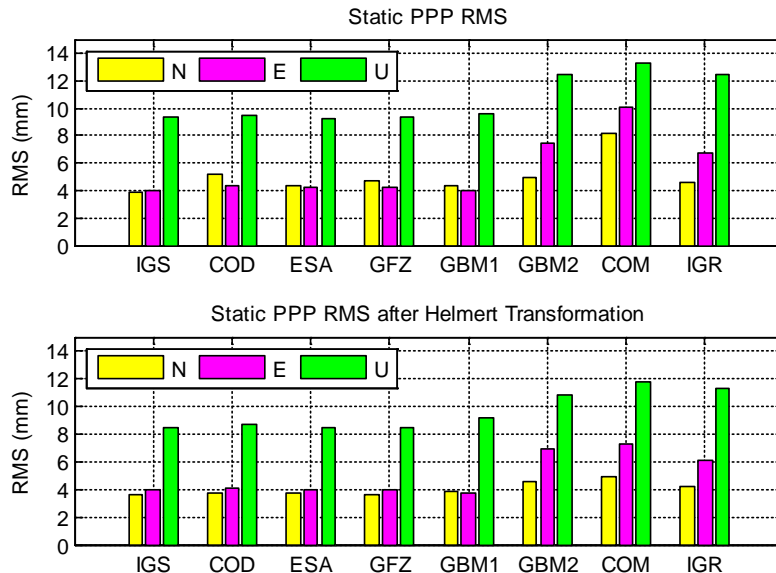


图 3.8 不同分析中心轨道钟差静态 GPS PPP 定位结果差异（上子图：未作参数转换；下子图：Helmert 参数转换后）

为了进一步验证各分析中心产品的一致性，对 2015 年 12 月 27 日至 2016 年 1 月 9 日 14 天共 49 个 MEGX 监测站进行静态 GPS PPP，并统计其坐标重复性，见图 3.9，其中 30 秒钟差采样率下的结果在高程上的重复率约为 7.3mm，略低于 (Kouba, 2015) 中的结果。

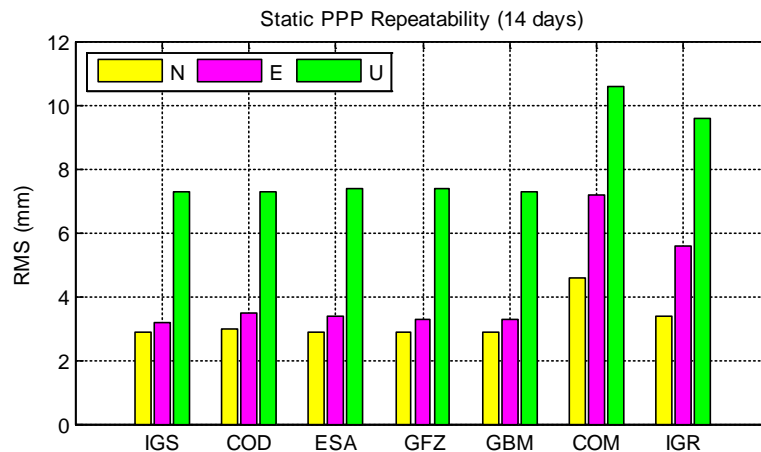


图 3.9 不同分析中心轨道钟差静态 GPS PPP 连续 14 天的坐标重复性

⁹⁰ http://acc.igs.org/index_igsacc_ppp.html

3.2.2 动态 PPP

与静态 PPP 类似，对 3.1.2 中的 GPS 数据进行动态 PPP 定位，取定位 1 小时后的定位误差作为收敛后的结果，统计其后的定位误差的 RMS，得到每天的动态定位精度，所有站所有天在三个方向上的定位误差分布见图 3.10，其各个方向及平面、三维上的 RMS、最小值及最大值的统计见表 3.3。

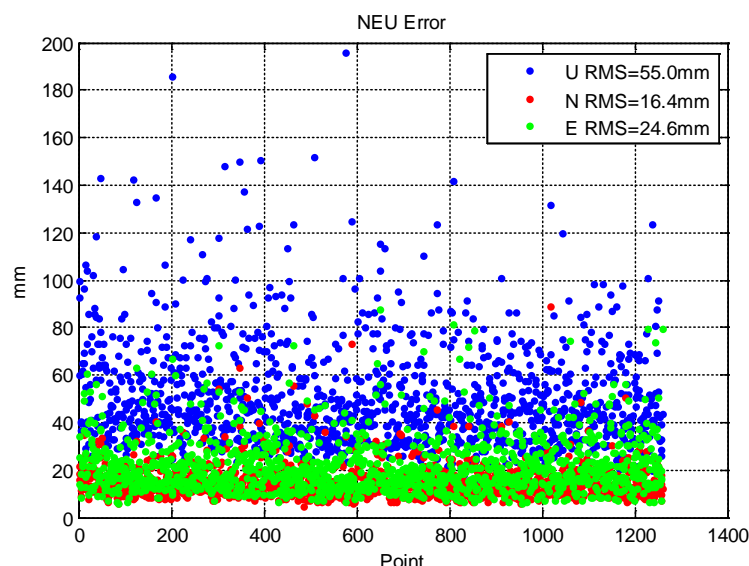


图 3.10 动态 GPS PPP 定位误差

表 3.3 动态 GPS PPP 各方向上的定位精度统计（单位：毫米）

方向	RMS	Min	Max
N	16.4	4.8	89.3
E	24.6	5.9	87.5
U	55.0	16.2	196.2
平面	29.7	8.4	92.7
三维	62.6	20.1	202.2

由图表中可以看出，Net_PPP 动态 PPP 结果在 N、E、U 三个方向上的 RMS 分别为 1.6cm、2.5cm、5.5cm，Seepersad 的统计结果为 2.7cm、3.7cm、7.2cm(Seepersad, 2014)，Li 的定位精度则为 1.2cm、1.4cm、4.4cm(Li X, 2014)，Lou 的定位精度为平面 2.6cm，高程 3.9cm(Lou Y, 2016)。后两者可能是由于采用了非差观测数据并用 GIM 模型对电离层进行了约束。无论那种方式，动态 PPP 收敛后都能达到厘米级定位精度。

同样分析动态 PPP 的定位误差分布，将其定位误差按照平面每隔 1cm，高程每隔 2cm 统计其分布的百分比，图 3.11 为平面和高程的分布情况。可以看到，94%的平面误差在 6cm 以内，96%的高程误差在 10cm 以内。

与静态类似，分别采用 COD、ESA、GFZ、IGR、IGS、GBM1、GBM2、COM 的轨道钟差进行动态 GPS PPP，其定位精度见图 3.12。从图中可以看出，卫星钟差采样率对动态定位结果影响非常大，这是因为数据采样率是 30s。采用 30s 采样率卫星钟差时，动态定位精度能达到高程 6cm 以内，不同分析中心的产

品造成的差异在 5mm 以内,而对于 5min 采样率的卫星钟差,其动态定位误差在 高程上则超过了 10cm。本文第七章将对获取高采样率的卫星钟差的方法进行研究。

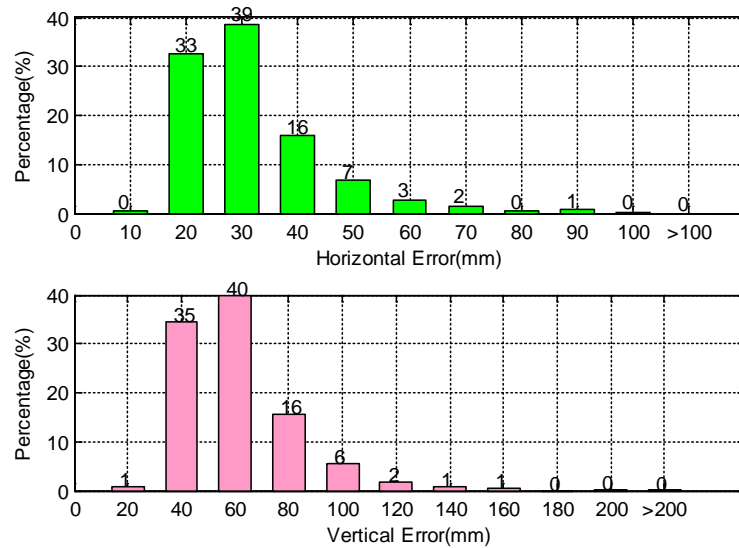


图 3.11 动态 GPS PPP 定位误差分布直方图 (上子图: 水平; 下子图: 高程)

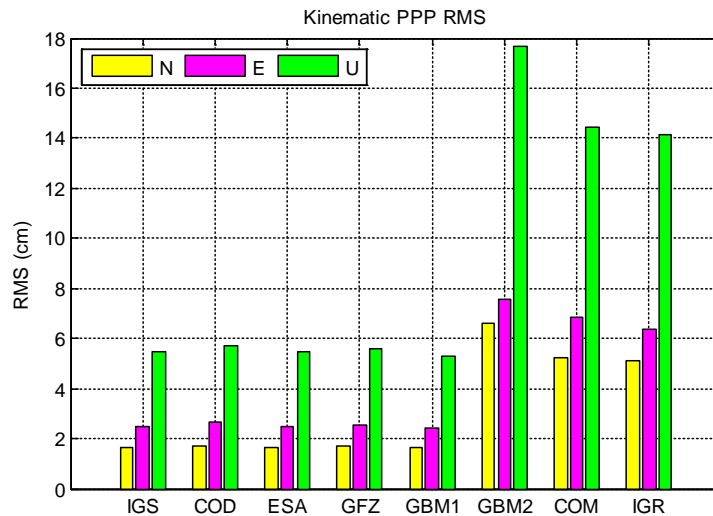


图 3.12 不同分析中心轨道钟差动态 GPS PPP 定位 RMS 差异

3.3 收敛性分析

与 RTK 相比, PPP 需要较长时间才能收敛至厘米级精度。一般情况下, 1 小时左右 PPP 水平定位精度才能收敛至 5cm(Choy, 2017),这也成为限制实时 PPP 应用的重要因素。为此,许多学者提出了 PPP 模糊度固定的方法(PPP Ambiguity Resolution)(Ge M, 2007; Laurichesse, 2009; Collins, 2008),这些方法在理论上是等价的(Geng J, 2010)。一旦模糊度固定,就能提高定位精度。Collins 和 Laurichesse 认为经过 PPP 模糊度固定,1 小时定位精度能提高 2cm。Geng 则得出 1 小时 PPP

模糊度固定后定位精度能在 N、E、U 方向上从 1.5cm、3.8cm、2.8cm 提高至 0.5cm、0.5cm、1.4cm。但 Choy 等人对 2012 年 7 月 1 日至 7 月 7 日全球分布的 300 个 IGS 站的数据进行 PPP 模糊度固定，发现模糊度固定只对平面方向上略有改善，对高程方向上则几乎没有提高，且前 15 分钟和 6 小时后的浮点解和固定解差异很小，前 15 分钟的浮点解甚至优于固定解(Choy, 2017)。

除了模糊度固定因素，Juan 等人提出附加电离层和宽巷模糊度信息对无电离层模糊度进行约束以加快 PPP 收敛时间的方法(Juan, 2012)。另外，Yao 等人提出了利用对流层模型先验信息对对流层参数进行约束 (Yao Y, 2014)，在卫星个数较少时能提高定位收敛时间。

本节讨论模糊度固定外影响一般 PPP 收敛时间的其他因素。

对 3.1.2 节的静态和动态 GPS PPP 第 1 个小时的定位结果进行统计。每隔 5 分钟取其定位结果。方法一：计算三维误差优于 20cm 的百分比，方法二：计算所有站的平均三维误差。图 3.13 是这两种方法的统计结果，上子图为方法一，下子图为方法二。由图中可以看出，静态定位的收敛效率和精度明显高于动态，静态定位在半小时内三维误差能收敛至 0.1m，动态定位则半小时收敛至 0.2m，1 小时后能收敛至 0.1m。

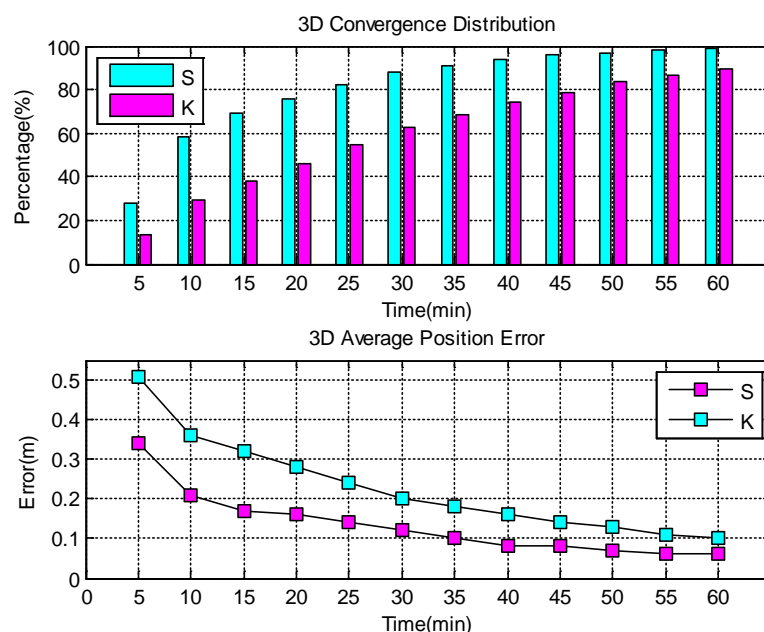


图 3.13 静态和动态 GPS PPP 第 1 个小时内定位收敛情况 (S: 静态; K: 动态, 下同)

3.3.1 钟差采样率

3.2 节结果中发现卫星钟差采样率对动态和静态 PPP 的最终精度都有影响，因此必然也会对收敛时间内的精度产生影响。

将 30s 卫星钟差采样率重新采样至 5min，同样对 30s 观测数据进行静态和动态 PPP，将结果与原 30s 的结果进行比较，第 1 小时内三维误差优于 20cm 的百分比比较结果见图 3.14。

可以看到，卫星钟差采样率无论对静态还是动态 PPP 收敛时间的影响十分明显，即使在 1 小时后，两种钟差的定位误差差异仍然比较大：对于静态定位，若采用 30s 卫星钟差，超过 98%的结果在一小时后三维误差小于 20cm；而若采

用 5min 卫星钟差，这一比例只有 82%。对于动态定位，二者差异更加悬殊。这是因为利用 5min 卫星钟差对 30s 采样率观测数据进行钟差内插时，无论是线性内插还是多项式插值，其内插精度只能达到 0.1~0.2ns(徐维梅, 2008)，该影响在精密定位中不可忽略。因此，无论是对精密定位收敛时间还是最终定位误差，最好使用不低于观测数据采样率的卫星钟差。只有当卫星钟差采样率达到 5s 以内时，进行线性内插才不影响钟差精度(Bock, 2009)。

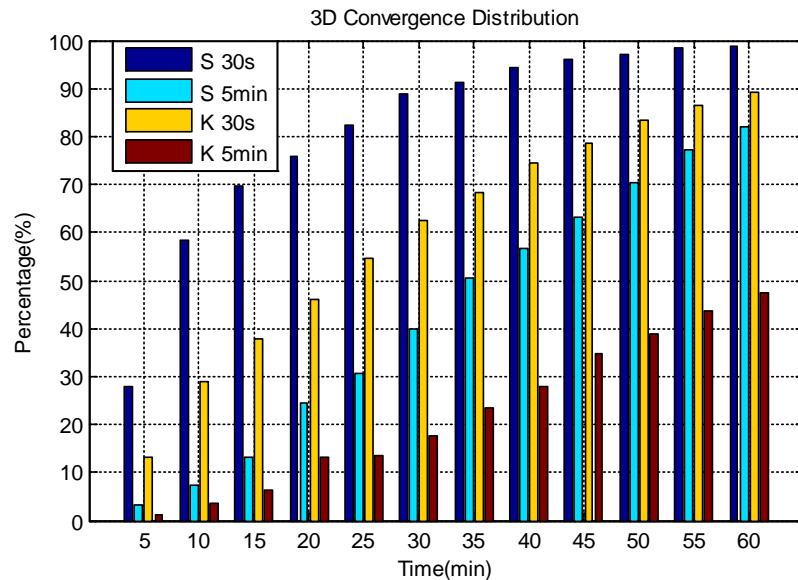


图 3.14 30s 和 5min 采样率卫星钟差对静态和动态 GPS PPP 收敛情况的影响

3.3.2 数据采样率

钟差采样率会影响 PPP 收敛时间，那么观测数据采样率是否也会对收敛时间产生影响？

将 30s 原始观测数据重新采样至 1min 和 5min，采用 30s 卫星钟差进行静态和动态 PPP，将这三种结果进行比较。第 1 小时内所有站的平均定位误差统计见图 3.15。

可以看到，对于静态 PPP，定位误差在前 15 分钟略有差异，15 分钟后观测数据采样率对定位结果没有影响。对于动态定位，30 分钟后 30s 和 1min 采样率数据的定位结果几乎相同，1 小时后三种采样率数据的定位结果差异很小。因此对于超大观测网络及多 GNSS 数据处理，可以适当降低数据采样率而不影响产品精度(陈俊平, 2014)。

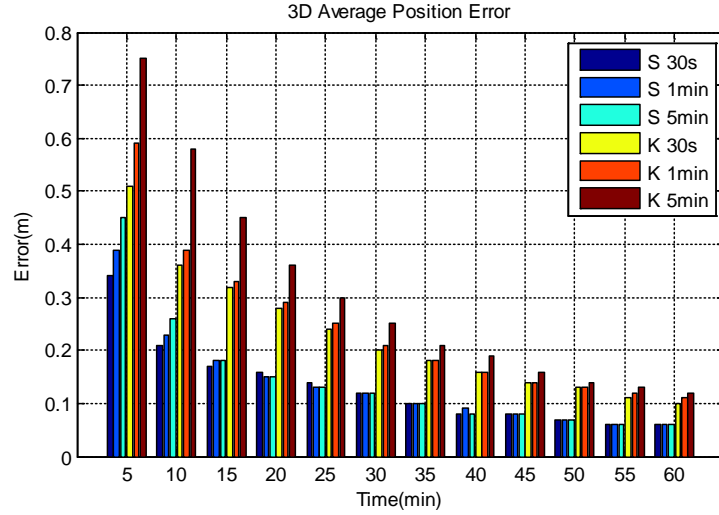


图 3.15 30s、1min 和 5min 采样率观测数据对静态和动态 GPS PPP 收敛情况的影响

3.3.3 DOP 变化及参数相关性

根据式(2.94)，GNSS 定位中的协方差阵 \mathbf{Q} 为：

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G})^{-1} = \begin{bmatrix} q_{xx} & q_{yx} & q_{zx} & q_{tx} & q_{Tx} & q_{Ax} \\ q_{xy} & q_{yy} & q_{zy} & q_{ty} & q_{Ty} & q_{Ay} \\ q_{xz} & q_{yz} & q_{zz} & q_{tz} & q_{Tz} & q_{Az} \\ q_{xt} & q_{yt} & q_{zt} & q_{tt} & q_{Tt} & q_{At} \\ q_{xT} & q_{yT} & q_{zT} & q_{tT} & q_{TT} & q_{AT} \\ q_{xA} & q_{yA} & q_{zA} & q_{tA} & q_{TA} & q_{AA} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

以 X、Y 参数为例，定义其相关系数为：

$$\rho_{xy} = \frac{q_{xy}}{\sqrt{q_{xx} q_{yy}}} \quad (3.2)$$

相关系数越小，表明参数间的相互影响越小，相关系数越大，则表明一个参数很容易被另一个参数吸收而不影响观测方程的残差。

式(3.1)中的对角元素反映了观测方程的精度因子（Dilution of Precision, DOP）。对于卡尔曼滤波或者序贯平差，随着观测历元的累积，协方差阵发生变化。一般来说，矩阵中的对角元素由于误差方程系数平方总是正数，而坐标行列上的非对角元素，由于卫星位置的变化，则慢慢变小，因此随着卫星 DOP 值的变化，坐标参数和其他参数的相关性越来越小，即各参数的解越来越稳定。

以和坐标参数相关性较大的对流层参数为例，定义其相关系数为：

$$\rho_{xyzT} = \frac{q_{xT} q_{yT} q_{zT}}{\sqrt{q_{xx} q_{yy} q_{zz} q_{TT} q_{TT} q_{TT}}} \quad (3.3)$$

统计所有静态 PPP 结果中第 1 个小时内平均 ρ_{xyzT} 与时间、平均定位误差与

时间、平均定位误差与平均 ρ_{xyzT} 的关系，分别见图 3.16 的左上图，右上图和下图。由图可知， ρ_{xyzT} 和定位误差都随着时间而慢慢减小， ρ_{xyzT} 和定位误差则呈现出强烈的线性相关关系。排除第 5 分钟定位误差（可能受伪距噪声的影响），对其余点进行线性拟合，其相关系数达到 0.9967。可见 DOP 值的变化使参数间的相关系数变小，而相关系数则直接影响坐标等参数的收敛和稳定性。

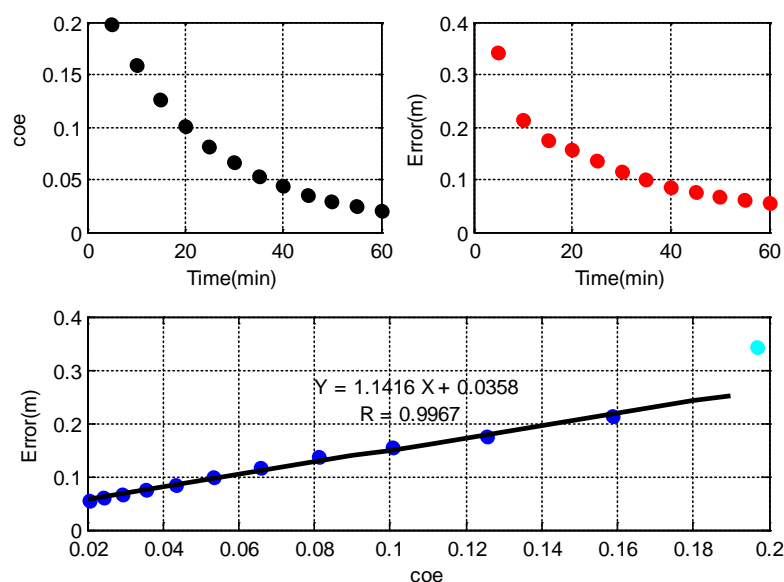


图 3.16 相关系数与时间、定位误差的关系

3.3.4 伪距噪声及接收机类型

从图 3.16 可以看到，第 5 分钟的定位误差与参数相关系数的关系偏离其他时间与参数相关系数拟合而成的线性函数，推测可能受接收机伪距噪声的影响，因此本小节对其进行进一步分析。

为排除 DOP 值差异的影响，选择 2016 年 1 月 1 日至 1 月 9 日位于北美距离最近的共 18 个 IGS 监测站，见图 3.17，各站纬度差异在 1° 以内，经度差异在 2.5° 以内。各站的经纬度信息和接收机、天线类型见表 3.4。

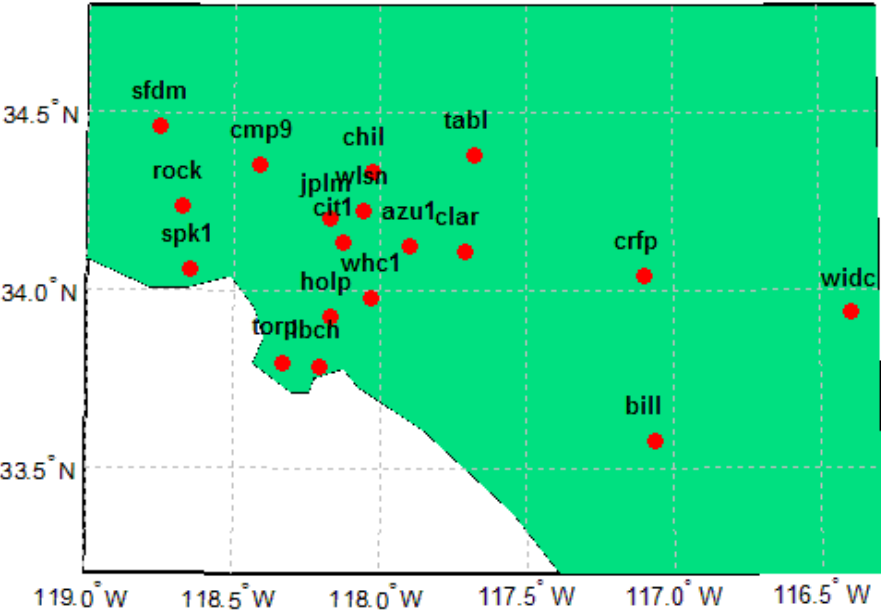


图 3.17 IGS 监测站分布

表 3.4 IGS 监测站经纬度及接收机、天线类型

站名	纬度	经度	接收机类型	天线类型
azu1	34.1260	-117.8965	TRIMBLE NETRS	ASH701945B_M
bill	33.5782	-117.0646	TRIMBLE NETRS	ASH701945B_M
lbch	33.7878	-118.2033	TRIMBLE NETRS	ASH700936D_M
sfdm	34.4598	-118.7545	TRIMBLE NETRS	ASH701945B_M
cit1	34.1367	-118.1273	TRIMBLE NETR9	TRM57971.00
tabl	34.3818	-117.6783	TRIMBLE NETR9	TRM57971.00
widc	33.9348	-116.3918	TRIMBLE NETR9	TRM57971.00
crfp	34.0391	-117.0997	TRIMBLE NETR9	TRM57971.00
clar	34.1099	-117.7088	TPS NET-G3A	TPSCR.G3
holp	33.9245	-118.1682	TPS NET-G3A	TPSCR.G3
cmp9	34.3532	-118.4114	TPS NET-G3A	TPSCR.G3
whc1	33.9799	-118.0312	TPS NET-G3A	TPSCR.G3
wlsn	34.2261	-118.0559	TPS NET-G3A	TPSCR.G3
chil	34.3334	-118.0260	TPS NET-G3A	TPSCR.G3
torp	33.7978	-118.3306	TPS NET-G3A	TPSCR.G3
spk1	34.0593	-118.6462	TPS NET-G3A	TPSCR.G3
rock	34.2357	-118.6764	TPS NET-G3A	TPSCR.G3
jplm	34.2048	-118.1732	JPS EGGDT	AOAD/M_T

对 9 天的数据进行静态 GPS PPP。为观察噪声的差异，每种接收类型各选取一个站的定位残差进行比较。图 3.18 为 sfdm(Trimble NETR9)、cmp9(TPS NET-G3A)、jplm(JPS EGGDT)三个站 2016 年 1 月 9 日的伪距定位残差和相位定位残差与高度角的关系。可以看出，sfdm 的伪距残差最大，cmp9 次之，jplm 的

最小。对于相位残差，三者量级相同，没有太大差异。

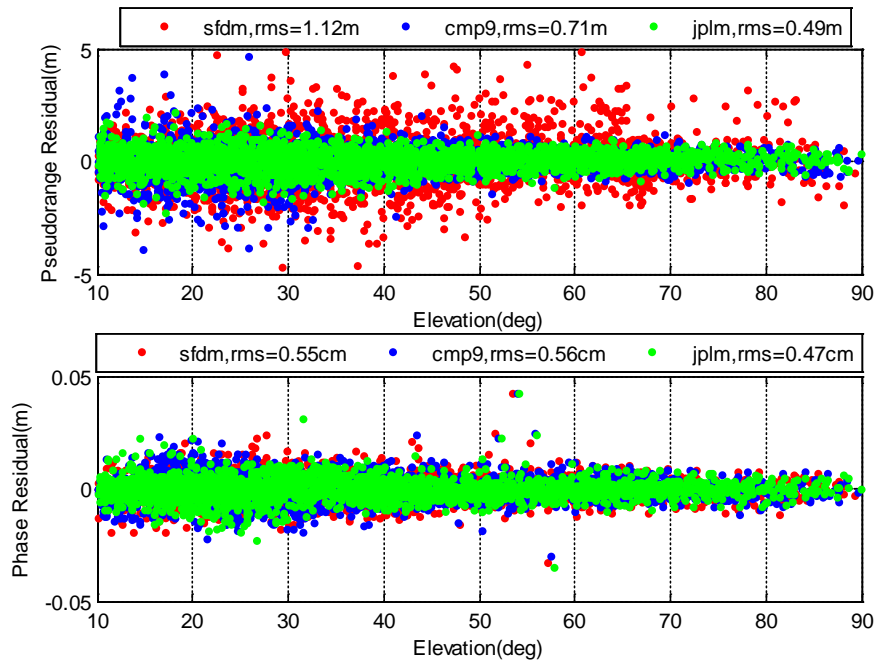


图 3.18 三种接收机类型的伪距（上子图）和相位（下子图）定位残差

为进一步验证伪距噪声是否与接收机类型有关，对每个站 9 天的伪距定位残差进行统计。按照接收机类型对第 5 分钟和第 10 分钟的定位误差与伪距噪声进行分类，见图 3.19。从图中可以看出，Trimble NETR9 型接收机的伪距噪声明显大于其他两类接收机，其第 5 分钟和第 10 分钟的定位误差也明显大于其他类型接收机，这说明伪距噪声与接收机类型有关，也说明伪距噪声影响初始化时的定位误差。

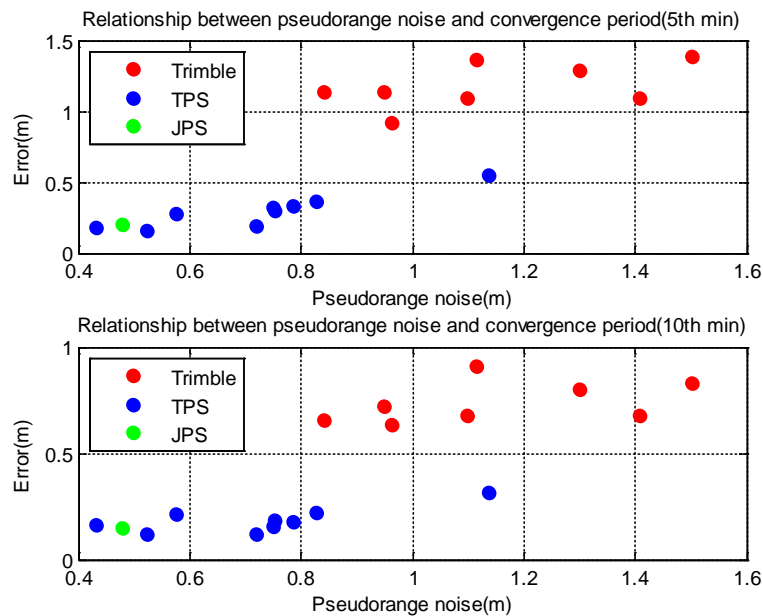


图 3.19 三种类型接收机伪距噪声与第 5 分钟（上子图）和第 10 分钟（下子图）定位误差的关系

为观察每个站在不同时间内的定位误差，按照接收机类型对其进行分类，统计定位前 12 分钟内每个站的定位误差，见图 3.20。结合图 3.19，可以看出 Trimble NETR9 型接收机由于噪声最大，其初始化定位误差也明显大于 TPS NET-G3A 和 JPS EGGDT 型接收机。

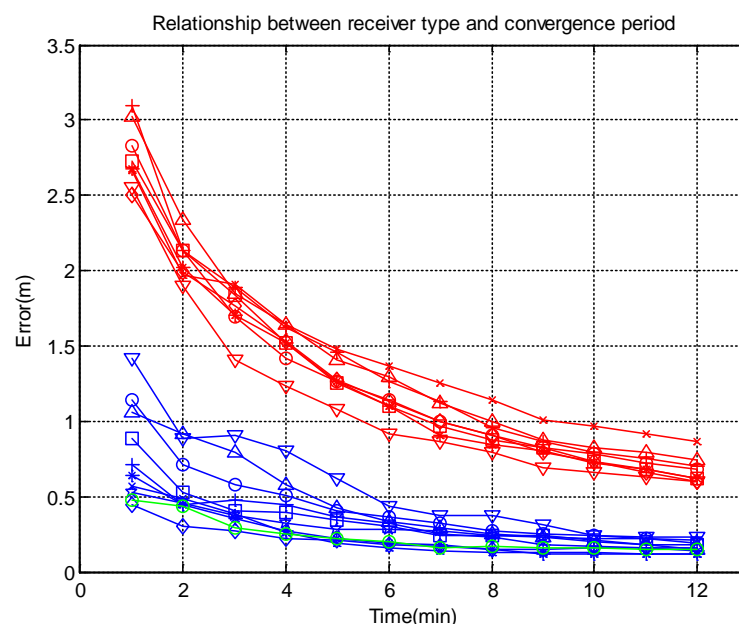


图 3.20 接收机类型与前 12 分钟定位误差的关系（红色：Trimble NETR9；蓝色：TPS NET-G3A；绿色：JPS EGGDT）

需要注意的是，接收机噪声只在一定时间内对定位误差产生影响。图 3.21 为 1 小时内定位误差与接收机类型的关系，可以看到，随着时间增加，不同类型接收机的定位误差差异慢慢减小。这一方面是由于数据的积累，接收机噪声的均值慢慢趋于零，另一方面则是随着时间变长，DOP 值的变化减小了参数之间的相关性。

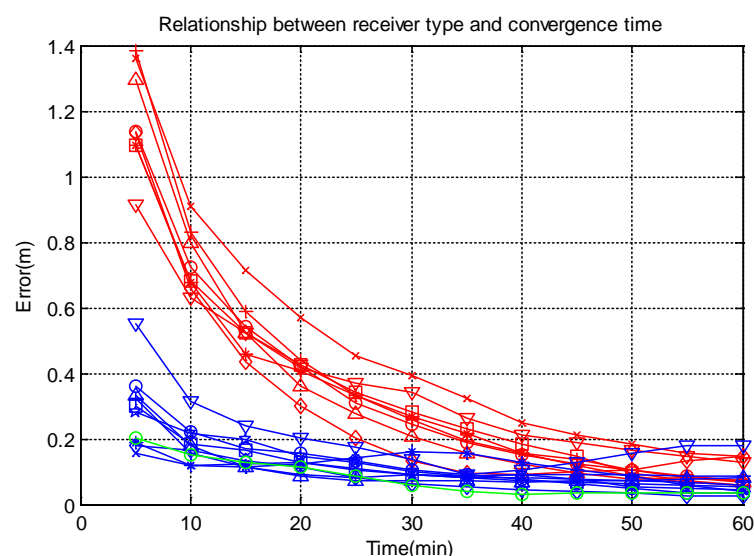


图 3.21 接收机类型与前 1 小时定位误差的关系（红色：Trimble NETR9；蓝色：TPS NET-G3A；绿色：JPS EGGDT）

3.3.5 对流层先验信息约束

如 2.5.3 所述, 精密定位中一般采用随机游走模型, 对流层天顶湿延迟进行参数估计, 对流层延迟的先验信息精度一般取 10cm。有的文献中也提到采用 50cm 的先验信息(Subirana, 2013)。但实际上, 如 2.3.5 所述, 目前的全球对流层延迟模型的精度一般可达 4~7cm, 对于对流层先验信息, 可以取适合模型精度的 5cm。

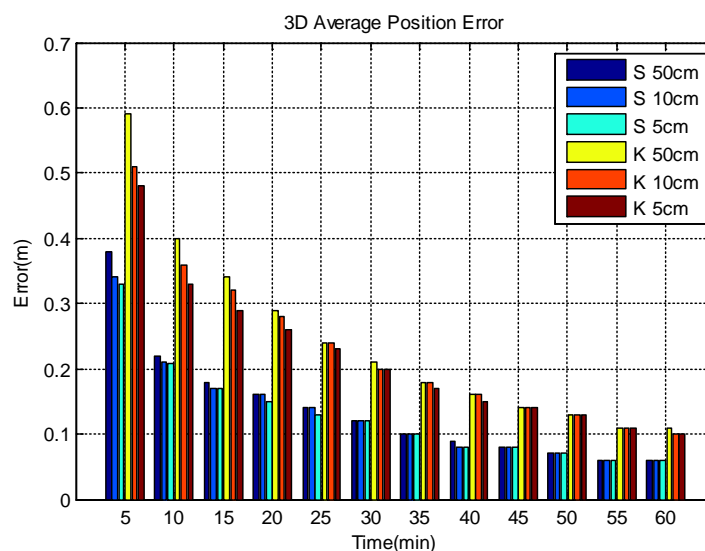


图 3.22 不同对流层先验信息约束对静态和动态 GPS PPP 收敛情况的影响

按表 3.1 所述, 采用 GPT2w+SAAS+VMF1 模型计算对流层延迟, 图 3.22 为分别采用 50cm、10cm、5cm 对流层先验信息的静态和动态 GPS PPP 后第 1 小时内所有站的平均定位误差。可以看到, 对流层先验信息只影响前 20 分钟左右的静态定位结果, 对动态定位结果影响则延续到 40 分钟左右。可见, 高精度对流层模型的建立, 可以提高 PPP 定位的收敛时间。但与前面几个因素相比, 其影响相对较小。

3.3.6 多系统组合

随着 GNSS 系统的发展, 多系统定位与单系统定位相比, 在收敛时间和最终定位精度上都有一定改善(Cai C, 2002; Li M, 2014; Li X, 2014; Chen J, 2015; Chen J, 2016; 任晓东, 2015)。本节对多系统对定位收敛时间的影响进行详细分析。

由前面分析可知卫星钟差采样率对定位的影响十分明显, 由于 GFZ 从 2015 年 5 月开始提供 30s 采样率的北斗卫星钟差, 为对北斗进行分析, 本小节只对 3.1.2 中 2015 年 5 月以后每隔 30 天一共 20 天的数据进行分析, 精密星历采用 GBM 精密星历。

如 2.5.1 节所述, 多系统融合定位时需估计 ISB/IFB 参数。对于 GLONASS, 由于各个卫星频率的不同, 各频率上的钟差也存在差异, 最大差异可达 25ns(Defraigne, 2011), 有研究表明各频率上的 IFB 与频率号存在近似的线性关系(Wanninger, 2012; Chen J, 2013)。因此对于 GPS+GLONASS 组合 PPP, 本文采取三种方案对其进行分析: (1) 按照频率号估计卫星 IFB (G+R IFB); (2) 将 IFB

按照与频率号相关的线性公式进行估计 (G+R IFBL); (3) 忽略频率间的差异, 对所有 GLONASS 卫星只估计一个与 GPS 相对的 ISB (G+R ISB)。

这样, 分别按照 GPS(G)、GPS+BDS(G+C)、GPS+GLONASS(G+R IFB、G+R IFBL、G+R ISB)一共 5 种模式进行静态和动态 PPP, 分析其收敛情况。第 1 小时内每隔 5 分钟各种模式所有站的平均三维定位误差变化见图 3.23。

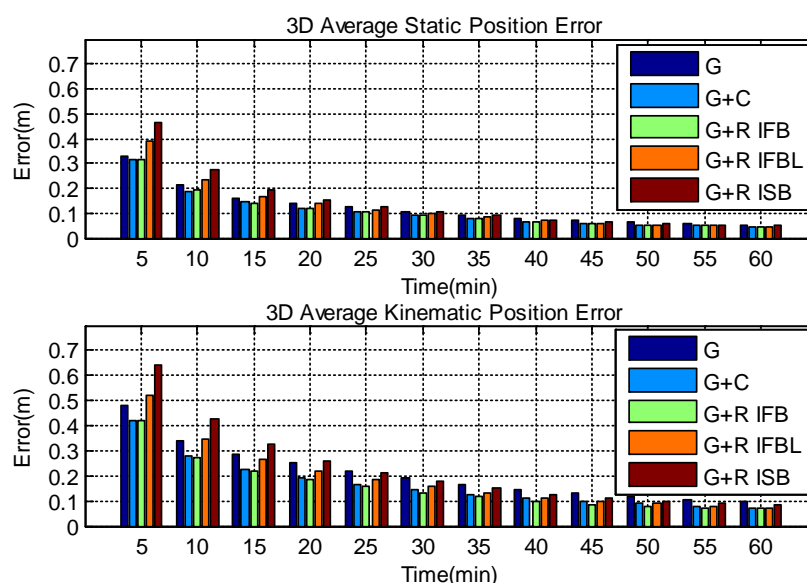


图 3.23 不同组合和参数估计模式下静态 (上子图) 和动态 (下子图) Multi-GNSS PPP 收敛情况

由图 3.23 可知, GPS/BDS 组合定位相比 GPS 单系统定位, 其收敛时间变短, 尤其对于动态定位, 半小时后的三维误差可由 20cm 减小至 15cm。而 GPS/GLONASS 组合定位, 只有按照频率号估计 IFB 时, 其对定位收敛时间的改善才优于 GPS 单系统, 把 IFB 按照与频率号相关的线性函数进行估计并不是最理想的方式, 但优于不考虑 IFB 的情况。但需要注意的是, 虽然 IFB 估计方式对 GPS/GLONASS 收敛时间有影响, 但 1 小时后三种模式的定位差异非常小。

为进一步分析 GLONASS IFB 参数的影响, 对 G+R IFB 模式下估计的 IFB 参数进行分析。选择几个不同接收机类型的观测站 BRST(TRIMBLE NETR9)、GMSD(TRIMBLE NETR9)、AREG(TRIMBLE NETR9)、WTZR(LEICA GR25)2014 年至 2015 年两年间每隔 30 天的 PPP 估计的各频点 IFB 值, 扣除每天的 IFB 均值后, 对其进行比较, 见图 3.24, 在这期间-5 频率号上无卫星编号。可以看到各天的 IFB 值并不一致, 这可能是精密钟差中每天的各卫星的钟差连续性不已知造成的。同时, 不同频点间的 IFB 也不一样, 对于 TRIMBLE 接收机, 各频率之间的 IFB 差异最大达到 8m 左右, 对于快速精密定位, 该差异不可忽略, 因此图 3.23 中忽略 IFB 的 G+R ISB 方法效果最差。虽然 IFB 与频率号存在近似的线性关系, 但线性拟合效果并不理想。这也是图 3.23 中 G+R IFBL 方法比 G+R IFB 方法结果差的原因。对于不同类型接收机, 其各频点的 IFB 变化趋势不一致。即使对于同一类型接收机, 不同站上的 IFB 差异仍然比较大, 这与 Banville 的结论一致 (Banville, 2016)。结合图 3.23, 对于精密定位, 最好仍按照频率号对 IFB 进行估计。

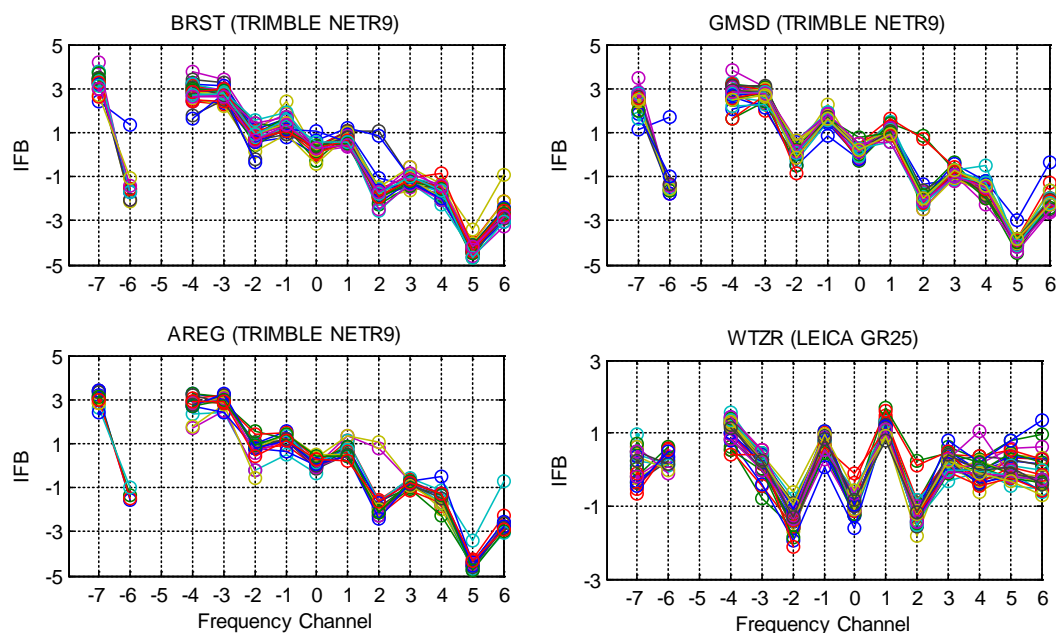


图 3.24 各频点扣除均值后的 GLONASS IFB 变化

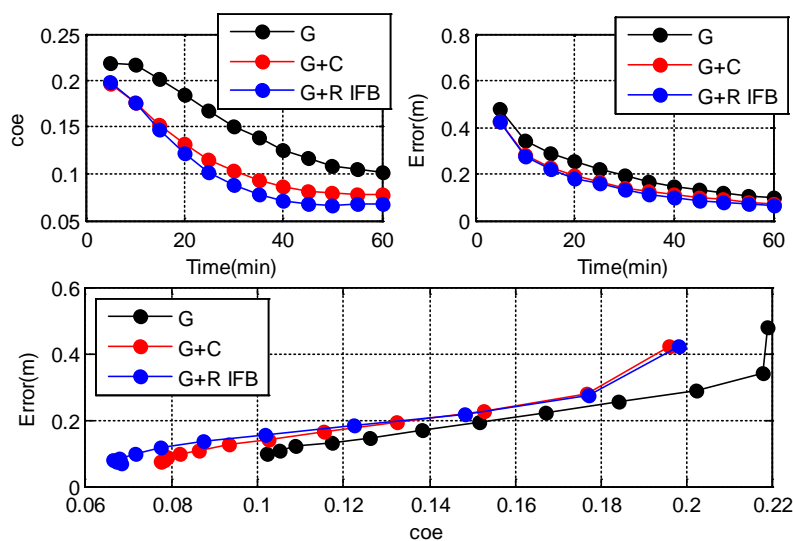


图 3.25 不同系统组合的相关系数与时间、定位误差的关系

多系统组合对定位结果的改进实际上是增加了卫星观测个数,完善了卫星几何构型 DOP 值。结合 3.3.3 节所述原理,以 GPS(G)、GPS+BDS(G+C)、GPS+GLONASS(G+R IFB)在第 1 小时的动态 PPP 结果为例,按照 3.3.3 节所述方法计算 ρ_{xyzT} 与时间、定位误差的关系,见图 3.25。由图可知多系统组合定位本质上是减小了参数之间相关性,从而提高了定位精度。

3.4 PPP 定位性能提升分析

由上一节的结果可知，一般静态 PPP 在 1 小时后能收敛至 5cm 以内，动态模式下则能收敛至 10cm 以内。数据采样率、接收机伪距噪声、对流层先验信息等因素由于数据累积的原因其对定位的影响越来越小。无论是静态 PPP 的最终定位误差，或是动态定位收敛后的定位精度，还受哪些因素的影响？

本节讨论对收敛后的定位精度产生影响的两个因素。

3.4.1 多系统对 PPP 性能的影响

从图 3.23 可以发现，多系统组合对于动态 PPP，在 1 小时后的定位精度仍然略高于单系统结果。仍然采用 3.3.6 节中的数据和 GBM 轨道钟差，对收敛后的不同系统组合的定位精度进行分析，GPS+GLONASS 三种定位模式在收敛后的定位差异很小，这是由于 IFB 差异部分可以被相位模糊度吸收。对于静态 PPP 模式，仍选择最后一个历元的坐标误差作为最终结果；对于动态 PPP 模式，统计 1 小时后的定位误差的精度，表 3.5 为 GPS (G)、GPS+GLONASS (G+R)、GPS+BDS (G+C) 三种模式在静态和动态情况下在 N、E、U 三个方向上的定位误差和精度。

由表 3.5 可知，多系统对静态 PPP 的精度提升很小，GPS+BDS 的定位精度甚至出现了降低，这可能是因为目前北斗的精密星历精度较低，GEO 卫星为 50cm 左右，IGSO/MEO 卫星则为 10cm 左右(Montenbruck, 2016)，而 GPS 精密轨道和钟差的精度则为 1~2cm。由于二者空间信号精度的差异，应在定位时对不同卫星系统和卫星类型的权重进行重新分配。

对于动态 PPP，多系统都能明显改善三个方向上的定位精度。以 GPS 和 GPS+GLONASS 两种模式为例，图 3.26 为每个站所有天的动态 PPP 统计结果比较，可以发现 GPS+GLONASS 组合定位精度在大部分站上相较 GPS 单系统均有一定程度的改善。

表 3.5 不同系统组合的静态和动态 PPP 统计结果

方向	静态			动态		
	G	G+R	G+C	G	G+R	G+C
N(cm)	0.43	0.37	0.44	1.64	1.37	1.39
E(cm)	0.40	0.36	0.47	2.42	1.85	1.85
U(cm)	0.96	0.88	0.97	5.29	4.64	4.90

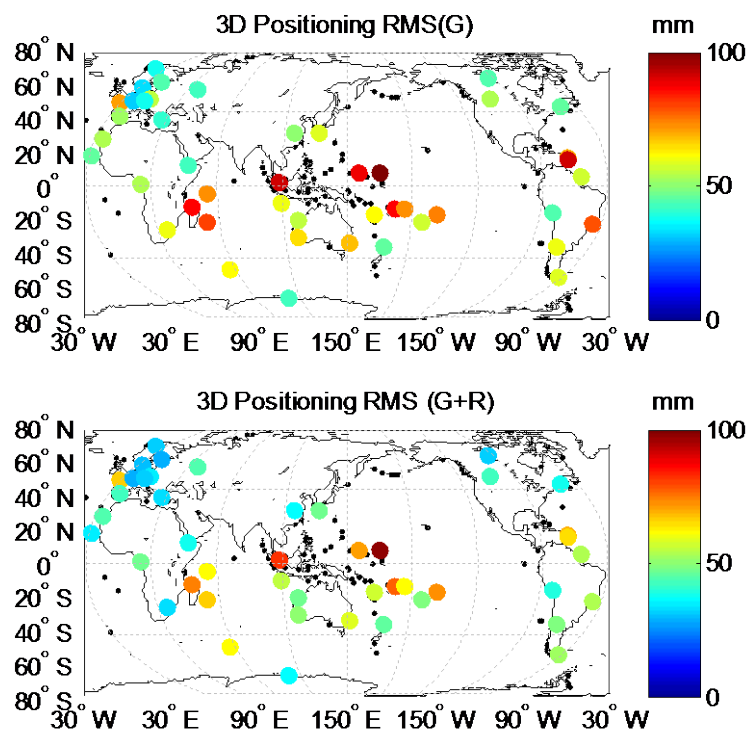


图 3.26 不同系统组合的动态 PPP 定位精度统计（上子图：GPS；下子图：GPS+GLONASS）

3.4.2 钟差采样率对 PPP 性能的影响

3.2 节和 3.3.1 节证明卫星钟差的采样率不仅影响定位收敛时间，还影响最终 PPP 定位性能。本小节对其进行进一步分析。

选取与 3.2 节一样的数据，将 IGS 事后精密卫星钟差重新采样至 5min 后进行静态和动态 GPS PPP，并与原始 30s 卫星钟差的定位结果进行比较，见表 3.6。从表中可知，5min 采样率卫星钟差 PPP 结果明显比 30s 的差，与 3.2 节中的结论一致。

图 3.27 为采用 gbm 精密星历进行 GPS+BDS 动态 PPP 的结果，图中虚线时间点为 2015 年 5 月。从图中可以看出，2015 年 5 月开始，gbm 精密钟差的采样率由 5min 变为 30s，动态 PPP 的精度迅速由分米级提高至厘米级，可见钟差采样率对动态 PPP 的结果影响很大。为了减少卫星钟差内插造成的精度损失，卫星钟差采样率最好不低于数据采样率。本文第七章将对获取高精度高频 GNSS 卫星钟差进行研究。

表 3.6 不同卫星钟差采样率下 GPS 静态和动态 PPP 定位结果

方向	静态		动态	
	30s	5min	30s	5min
N(cm)	0.39	0.46	1.64	5.13
E(cm)	0.40	0.67	2.46	6.40
U(cm)	0.93	1.24	5.50	14.20

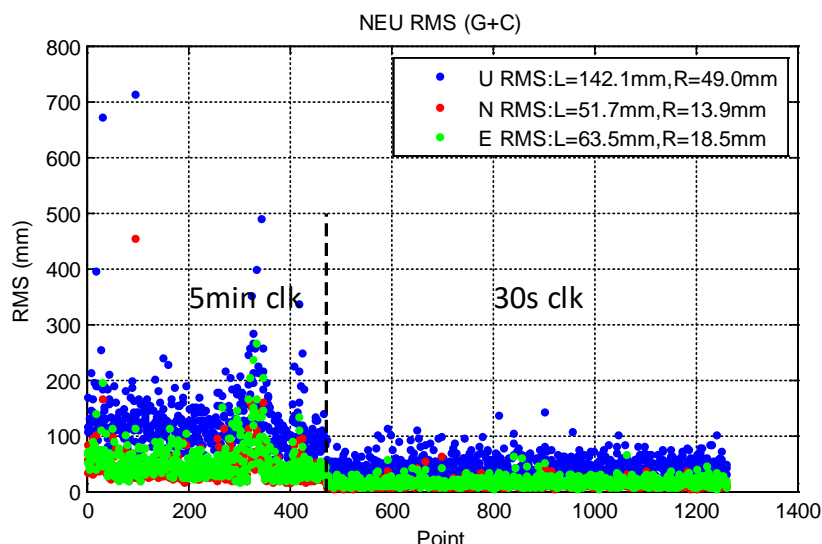


图 3.27 不同卫星钟差采样率对动态 PPP 定位精度的影响

3.5 本章小结

本章介绍了 Net_PPP 软件的功能和配置,使用该软件对 2014 年至 2016 年全球分布 MGEX 数据进行了静态和动态 PPP,并对其结果进行分析,结果表明:

(1)GPS 静态 PPP 定位精度在 N、E、U 三个方向上的定位精度可达 3.9mm、4.0mm、9.3mm,动态 PPP 精度可达 1.6cm、2.5cm、5.5cm,与目前国际上传统 PPP 的定位精度相当。相同条件下,采用不同分析中心产品的静态定位结果差别在 1mm 以内,动态定位结果差异则在 5mm 以内。

(2)静态 PPP 在半小时内三维误差能收敛至 0.1m,动态 PPP 则在半小时内收敛至 0.2m,1 小时后收敛至 0.1m。PPP 收敛时间受钟差采样率、数据采样率、DOP 变化及参数相关性、伪距噪声及接收机类型、对流层先验信息约束、多系统组合等因素的影响。

(3)多系统组合和卫星钟差采样率同样影响 PPP 收敛后的定位精度,随着 BDS、Galileo、QZSS、IRNSS 等卫星系统的进一步发展和卫星数的增加,多系统高频精密卫星钟差的获取及多系统组合定位也是近几年的一大研究热点。

第4章 北斗广播星历偏差分析

由上一章分析结果可知,卫星轨道和钟差误差是制约用户定位精度的最主要原因。对于基本导航用户定位,广播星历误差也是影响用户定位的主要因素。

受混合星座区域网定轨和钟差预报精度的限制(Zhou S, 2012),目前我国北斗广播星历的精度还不如GPS。自北斗系统投入运行以来,国内外许多学者对北斗广播星历精度进行了评估。Montenbruck 分析了2013年全年的北斗广播星历精度,认为北斗广播星历钟差精度与GPS Block IIA卫星相当,均好于GLONASS和Galileo卫星(Montenbruck, 2015a)。随后Montenbruck又分析了2016年8月的北斗广播星历精度,认为与2013年的结果相比,GPS和Galileo广播星历精度提高了,而GLONASS和BDS则下降了若干分米(Montenbruck, 2017)。Chen对2012年的北斗广播星历轨道进行分析,表明GEO卫星径向精度优于1.5m,IGSO/MEO卫星径向精度优于1.0m,但没有考虑钟差误差的影响(Chen L, 2013)。Hu由2012年的结果表明北斗广播星历所有卫星平均精度为1.5m,且主要受钟差误差的影响(Hu Z, 2013)。刘等人基于2013年至2015年的结果,得出所有卫星的广播星历精度平均为1.85m,认为广播星历轨道和钟差误差呈现出与其轨道周期一致的周期变化特性(刘万科, 2016)。激光检核(Satellite Laser Ranging, SLR)比较结果与事后精密定轨比较结果一致(耿涛, 2015)。Zhang等人基于事后精密星历分析了北斗空间信号误差的预报和改正(Zhang Y, 2014)。我国也建立了若干个iGMAS(international GNSS monitoring and assessment)分析中心,对包括北斗系统在内的GNSS系统的空间信号参数进行监测和评估。

本章在各大GNSS系统星历误差分析的基础上,重点对北斗广播星历误差特点进行研究。

4.1 广播星历误差

IGS于2012年提出MGEX计划,致力于提供多GNSS系统服务。根据图3.5,目前共有CODE、GFZ、WHU三个分析中心提供包括GPS/GLONASS/Galileo/BDS/QZSS在内的事后精密轨道和钟差。其中GFZ从2015年5月开始,提供30s采样率的MGEX卫星钟差⁹¹,其北斗GEO轨道精度约为50cm,IGSO和MEO轨道精度约为10cm和5cm(Deng Z, 2014)。因此本文以gbm精密轨道和钟差为参考,通过比较广播星历和gbm精密星历的差异对GPS/GLONASS/Galileo/BDS四大系统的广播星历误差进行研究。

在进行广播星历轨道和钟差比较时,需要考虑以下几点:

(1) 坐标系统

如2.1.3节所述,2013年12月31日15时(UTC)以后GLONASS采用PZ90.11坐标框架,因此各个系统所采用的坐标框架与ITRF框架的差异在厘米级,这样

⁹¹ <http://www.gfz-potsdam.de/en/section/space-geodetic-techniques/projects/mgex-beidou-analysis/>

的量级在进行广播星历比较时可以忽略。

(2) 时间系统

如 2.1.1 节所述, GPS 和 Galileo 的时间系统均基于 GPST, gbm 及其他分析中心的精密星历同样基于 GPST。BDS 所采用的 BDT 与 GPST 存在 14 秒的固定差异, GLONASS 则与 UTC 保持一致, 与 GPST 之间存在跳秒差异, 见图 2.2。因此 BDS 和 GLONASS 在进行比较时需要进行时间系统基准差异修正。

(3) TGD 及钟差相对论改正

如 2.3.3 节所述, gbm 及其他分析中心的精密钟差是基于 L1L2(GPS、GLONASS)、E1E5a(Galileo)、B1B2(BDS)无电离层组合, GPS、GLONASS 广播星历钟差同样基于 L1L2 无电离层组合, 因此无需进行 TGD 改正。

BDS 广播星历的卫星钟差则基于 B3 频点, 因此在比较卫星钟差时需要进行 TGD 改正, 具体改正方法可见 2.3.3 节式(2.55)。

Galileo 的 F/NAV 广播星历的钟差基于 E1E5a 无电离层组合, I/NAV 广播星历的钟差则基于 E1E5b 无电离层组合。因此使用 F/NAV 广播星历与精密钟差比较时无需进行 TGD/BGD 改正。实际上 E1E5a 和 E1E5b 钟差之间的差异非常小, 在进行广播星历钟差比较时可以忽略(Montenbruck, 2015a)。

如 2.3.2 节所述, GLONASS 广播星历中的钟差已经包含了钟差相对论改正, 而精密钟差则不包含钟差相对论改正, 因此在对 GLONASS 广播星历钟差进行比较时需扣除钟差相对论的差异。

(4) 卫星钟差基准统一

广播星历与精密星历在每个历元所选择的卫星钟差基准并不一样, 在进行钟差比较时, 需扣除卫星钟差基准差异的影响。部分文献在进行基准统一时, 选择扣除该历元所有卫星的广播星历与精密星历钟差差异的均值(Chen G, 2015; Montenbruck, 2015a; 刘万科, 2016)。这种方法的缺陷是当个别卫星存在粗差时, 会使均值偏离真实的基准差异, 从而无法反映真实的卫星钟差误差。本文选择所有卫星广播星历与精密星历钟差差异的中位数作为基准进行扣除, 这样能有效避免个别卫星钟差粗差污染其他卫星钟差比较结果。

(5) 相位中心偏差

gbm 及其他分析中心的精密轨道都是基于卫星质心(Kouba, 2015), 而各 GNSS 系统广播星历的轨道都是基于卫星相位中心, 因此在进行轨道比较时需扣除卫星 PCO 的影响。各 GNSS 系统控制中心在生成广播星历时使用卫星出厂时标定的 PCO 值, Montenbruck 等人通过比较精密轨道和广播星历轨道, 给出了各 GNSS 系统广播星历中使用的 PCO 值(Montenbruck, 2015a; Montenbruck, 2017), 见表 4.1。需要注意的是, BDS 广播星历轨道名义上定义为基于卫星相位中心, 但 SLR 检验结果表明其实际上是基于卫星质量中心, 因此在进行 BDS 轨道比较

时无需进行 PCO 改正。

表 4.1 各 GNSS 系统广播星历 PCO 改正

系统	Block	x(m)	y(m)	z(m)
GPS	Block II A	0.279	0.000	0.920
	Block II R-A	0.000	0.000	1.610
	Block II R-B/M	0.000	0.000	-0.040
	Block II F	0.394	0.000	1.160
GLONASS	GLONASS-M(SVN<720)	0.000	0.000	2.450
	GLONASS-M(SCN 720-747)	0.000	0.000	2.050
	SVN 742	0.000	0.000	1.950
	GLONASS-K1	0.000	0.000	2.050
Galileo	IOV(2013 年 DOY121 之前)	0.200	0.000	1.650
	IOV(2013 年 DOY121 至 2015 年 DOY060)	0.200	0.000	0.850
	IOV(2015 年 DOY060 后)	0.200	0.000	0.750
	FOC	-0.150	0.000	0.750
BDS		0.600	0.000	1.100

实际上, IGS在定轨时采用igs.atx中的PCO值, 与表 4.1 中的值并不一样, 其差异会被卫星钟差吸收, 因此在进行钟差比较时必须扣除二者之间的差异。对于 gbm精密星历, 其 2014 年DOY197 之前使用的PCO改正为IGS默认值(0.6, 0.0, 1.1)m, 其后使用的PCO改正值为ESA发布的值(Dilssner, 2014)⁹²。对比表 4.1, 在处理 2014 年年积日 197 之前的数据时, 北斗广播星历与gbm精密星历相位中心差异改正为 0, 2014 年年积日 197 之后的相位中心差异改正为 $\text{PCO}_{\text{ESA}} - [0.6 \ 0 \ 1.1]\text{m}$ 。

获得地心地固体系下 GNSS 广播星历和精密星历轨道钟差差异后, 可通过下式可将轨道差异旋转至卫星轨道坐标系。

$$\begin{bmatrix} R \\ A \\ C \end{bmatrix} = \mathbf{G}_{3 \times 3} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

式(4.1)中, R、A、C 分别为广播星历在卫星轨道坐标系中径向 (Radial)、切向 (Along-track) 和法向 (Cross-track) 的误差, $\mathbf{G}_{3 \times 3}$ 为地心地固坐标系至卫

⁹² <http://www.gfz-potsdam.de/en/section/space-geodetic-techniques/projects/mgex-beidou-analysis/>

星轨道坐标系的旋转矩阵。 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ 为地心地固系下的广播星历误差。

空间信号测距误差 (Signal-In-Space User Range Error, SISURE) 是卫星实际位置和钟差与卫星广播星历之间的差异的综合, 它反映了卫星轨道和钟差的整体误差, 可用于评价广播星历综合精度, 其计算公式为:

$$\text{SISURE} = \sqrt{(\alpha \cdot R - \text{Clk})^2 + \beta(A + C)^2} \quad (4.2)$$

式中 α 和 β 分别是各方向的投影系数, 对于不同轨道高度的卫星, 其值见表 4.2(胡志刚, 2013; Montenbruck, 2015a)。同时定义 R-Clk 为轨道径向与钟差误差的合成。由式(4.2)可以看出, R-Clk 占了 SISURE 的大部分。

同时定义轨道误差引起的空间信号误差为:

$$\text{SISURE}_{\text{orb}} = \sqrt{(\alpha \cdot R)^2 + \beta(A + C)^2} \quad (4.3)$$

表 4.2 不同 GNSS 系统 SISURE 计算系数

系数	GPS	GLONASS	Galileo	BDS(MEO)	BDS(GEO/IGSO)
α	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99
β	1/49	1/45	1/61	1/54	1/126

4.2 GNSS 广播星历误差分析

为了进行 GNSS 广播星历误差长期分析, 选择 2015 年 1 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日共约两年 (GPS/GLONASS/Galileo) 及 2015 年 2 月 1 日至 2016 年 10 月 26 日共约三年 (BDS) 的数据, 按照 30 分钟间隔的采样率计算 GNSS 广播星历的误差, 同时计算 SISURE 与 R-Clk。在计算中, 粗差剔除策略按照式(4.4)进行处理(Montenbruck, 2015a):

$$\text{ourlier} = \begin{cases} \text{SISURE} > 10 \text{ m and } A > 50 \text{ m,} & \text{BeiDou GEO} \\ \text{SISURE} > 10 \text{ m,} & \text{other} \end{cases} \quad (4.4)$$

4.2.1 GPS

GPS 目前共有 Block IIA, Block IIR, Block IIF 三种类型卫星, 这三种卫星上搭载的原子钟性能各有不同。每种类型卫星分别选取 3~4 颗卫星, 计算其 2015 年 1 月至 2016 年 12 月的广播星历在 R、T、N 三个方向上的轨道误差、钟差误差及空间信号精度的变化情况, 见图 4.1。

由图可见, 各种类型卫星的轨道误差在同一量级, 而钟差误差则存在明显差异, 由 Block IIA、Block IIR 至 Block IIF 钟差误差依次减小。这是因为 Block IIA 类型卫星上搭载的是 Cs 钟, 而最新的 Block IIF 卫星上则搭载钟差性能更加稳定的 Rb 钟。需要注意的是, G24 虽然是 Block IIF 卫星, 但其搭载的钟仍然是与 Block IIA 上相同的 Cs 钟(Montenbruck, 2015a)。另外, G32 虽然在 2016 年 DOY069 开始转变为 Block IIF 类型, 但其钟差存在系统性偏差, 直至 2016 年 DOY232

后才恢复正常，其原因仍值得进一步研究。

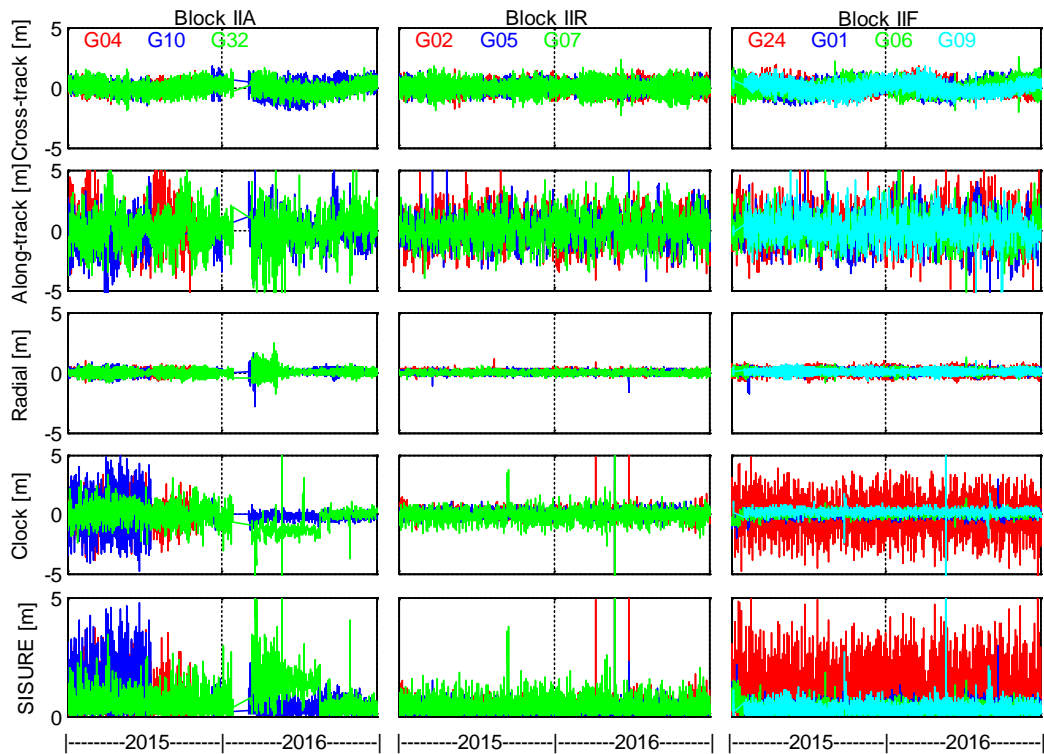


图 4.1 GPS 三种类型卫星的广播星历误差及空间信号精度变化（G10 在 2015 年 DOY343 以后由 Block IIA 变为 Block IIF，G32 在 2016 年 DOY069 以后由 Block IIA 变为 Block IIF；G24 上实际搭载的为 Cs 钟）

表 4.3 给出了不同类型卫星的广播星历在 R、T、N 三个方向上的轨道误差、钟差误差及空间信号精度的统计结果及所有卫星的整体结果。可以看出 Block IIF(已排除 G24)卫星空间信号精度最好，Block IIR 受钟差影响稍差一些，Block IIA 最差，其 SISURE 接近 1m。

总体来看，目前 GPS 广播星历空间信号精度已经能达到 0.55m，轨道空间信号精度达到 0.24m，这与最新的评估结果一致(Montenbruck, 2017)，这主要得益于 GPS 全球分布的监测站。相比 2013 年的评估结果，各项误差都有提高，其中 SISURE 提高了约 0.15m(Montenbruck, 2015a)。这主要是 GPS 卫星类型的更新导致的。图 4.2 显示了 2013 年至今 GPS 不同类型卫星的更新情况，可以看到 Block IIA 类型卫星逐渐减少，Block IIF 类型卫星则逐渐增加。未来，随着更多 Block IIF 和 Block III 类型卫星的增加，GPS 的广播星历空间信号精度将进一步一高。

表 4.3 GPS 广播星历误差及空间信号精度统计（单位：m）

Block	R	A	C	Clk	R-Clk	SISURE	SISURE_orb
II A	0.41	1.23	0.23	0.93	0.94	0.96	0.29
II R	0.49	1.12	0.14	0.47	0.47	0.50	0.22
II F	0.48	1.07	0.20	0.34	0.41	0.45	0.26
平均	0.48	1.12	0.17	0.49	0.52	0.55	0.24

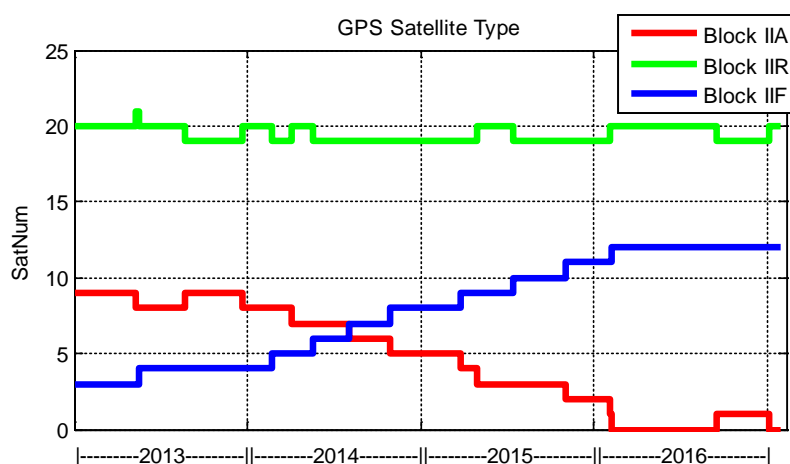


图 4.2 GPS 三种类型卫星数的变化情况

SISURE 反映了卫星空间测距误差的大小，而卫星径向和钟差误差的合成 (R-Clk) 能反映卫星空间测距误差的方向。为了观察 R-Clk 的长期变化，按照一个月进行划分，统计每个月的 R-Clk 均值。图 4.3 为图 4.1 中几种不同类型卫星的 R-Clk 的每个月均值及标准差变化趋势，图中标准差用误差棒表示。

可以看到 GPS 大部分卫星 R-Clk 误差均值都在 0 附近，除了 G32 在 2016 年 DOY069-2016 年 DOY231 间存在系统偏差，这是其钟差的系统性偏差引起的，见图 4.1。

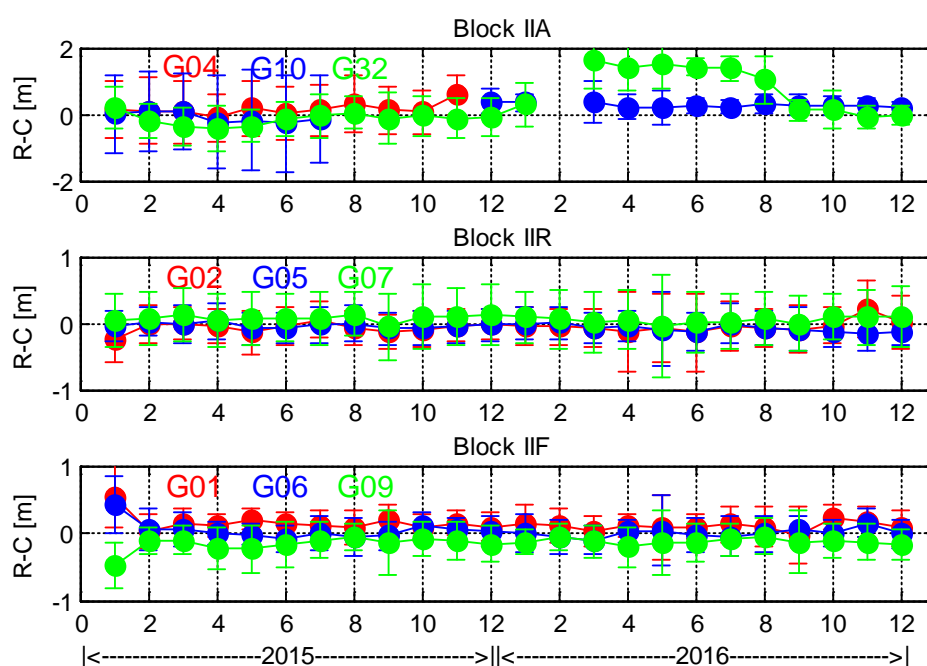


图 4.3 GPS 三种类型卫星 R-Clk 误差变化趋势

4.2.2 GLONASS

与 GPS 处理方法类似，图 4.4 列出了 R01~R09 卫星 2015 年 1 月至 2016 年 12 月的广播星历在 R、T、N 三个方向上的轨道误差、钟差误差及空间信号精度

的变化情况。其中大部分卫星均为 GLONASS-M 类型卫星，只有 R09 在 2016 年 2 月 16 日由 GLONASS-M 变为 GLONASS-K1，但从图中并未看出其钟差或空间信号精度有明显改善。另外，可以看到 GLOANSS 卫星钟差噪声较大，且部分卫星钟差均值并不在零附近。

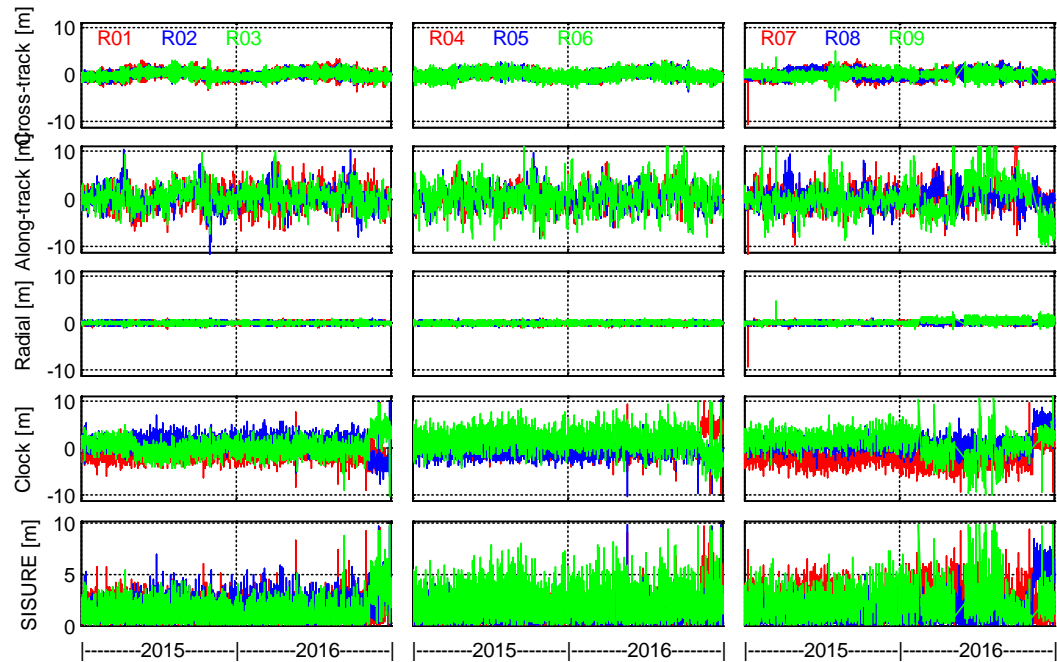


图 4.4 GLONASS 卫星的广播星历误差及空间信号精度变化

表 4.4 给出了 R01~R09 的广播星历在 R、T、N 三个方向上的轨道误差、钟差误差及空间信号精度的统计结果及所有卫星的整体结果。可以看到 GLONASS 卫星的轨道误差大致相同，略差于 GPS，钟差误差则各不一样。其空间信号精度明显差于 GPS，达到了 2.13m，其中钟差误差的影响占了大部分，其误差为 2.08m，这是因为 GLOANSS 卫星上搭载的是 Cs 钟，其钟差稳定性明显差于 GPS(Montenbruck, 2017)。与 2013 年和 2016 年 8 月的结果相比(Montenbruck, 2015; Montenbruck, 2017)，本文的结果介于二者之间，可见 GLONASS 广播星历空间信号精度在 2013 年至 2016 年之间逐渐下降了 2~3 分米。

表 4.4 GLONASS 广播星历误差及空间信号精度统计（单位：m）

PRN	R	A	C	Clk	R-Clk	SISURE	SISURE_orb
1	0.85	2.11	0.23	1.62	1.62	1.65	0.41
2	0.69	2.09	0.23	1.94	1.96	1.98	0.40
3	0.75	2.00	0.22	1.58	1.59	1.62	0.39
4	0.73	1.88	0.24	1.57	1.60	1.63	0.38
5	0.71	1.77	0.21	1.28	1.29	1.32	0.35
6	0.88	2.68	0.24	2.49	2.50	2.54	0.48
7	0.84	1.96	0.22	2.54	2.55	2.57	0.39
8	0.76	1.82	0.20	1.88	1.89	1.91	0.36
9	0.72	3.33	0.47	2.54	2.59	2.63	0.69
.....
平均	0.83	2.48	0.28	2.08	2.09	2.13	0.48

同样统计 GLONASS 卫星的每月 R-Clk 均值。图 4.5 为 R01~R09 卫星 R-Clk 的每月均值及标准差变化趋势，图中标准差用误差棒表示。

与 GPS 不同，GLONASS 很多卫星 R-Clk 误差均值均不为 0，除了最后两个月的结果，大部分误差均值都比较稳定，这说明 GLONASS 卫星 R-Clk 误差存在系统性偏差。

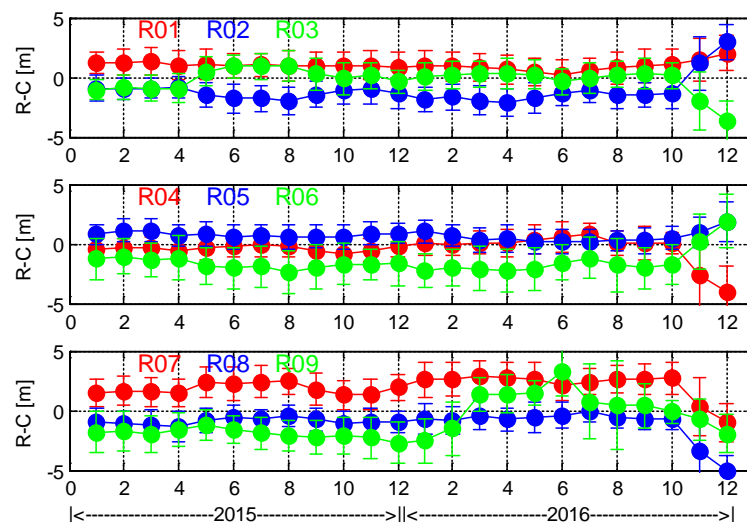


图 4.5 GLONASS 卫星 R-Clk 误差变化趋势

4.2.3 GALILEO

截至 2017 年初，Galileo 共有 11 颗卫星提供正常服务。图 4.6 列出了这 11 颗卫星 2015 年 1 月至 2016 年 12 月的广播星历在三个方向上的轨道误差、钟差误差及空间信号精度的变化。从图中可以看出 Galileo 的广播星历精度明显优于 GLONASS，与 GPS 在相同量级，除了 E24 卫星的钟差存在明显的系统性偏差。

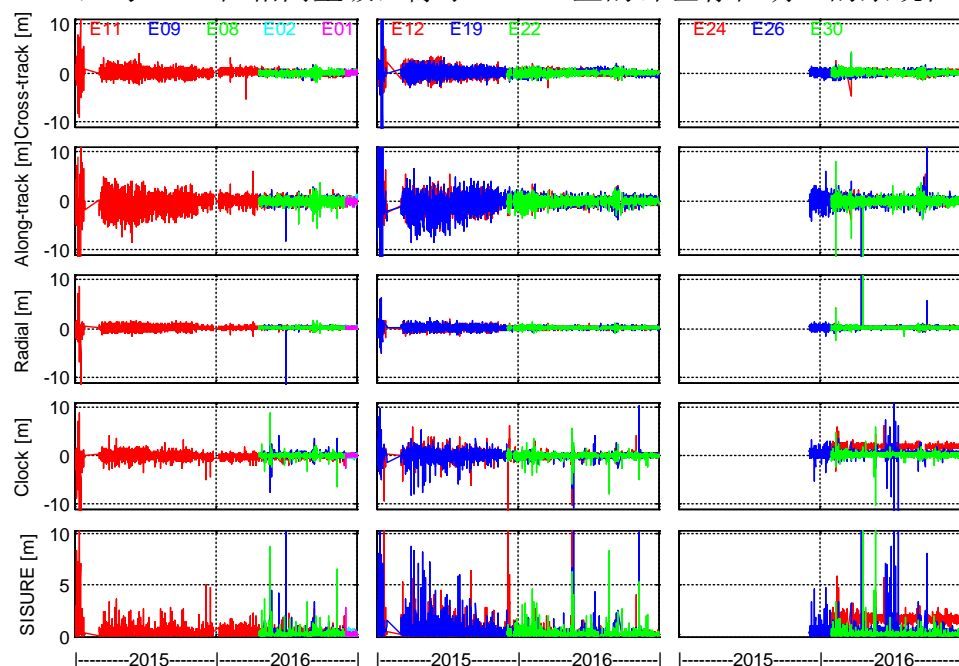


图 4.6 Galileo 卫星广播星历误差及空间信号精度变化

表 4.5 列出了这 11 颗卫星的广播星历误差及空间信号精度统计结果。其中“平均 1”表示所有卫星的平均水平，“平均 2”表示除去存在系统偏差的 E24 后其他卫星的平均水平。可以看到，Galileo 卫星轨道误差与 GPS 在同一水平，但其钟差误差明显好于 GPS，排除 E24 后甚至比 GPS 钟差误差还小，这是因为除了 E11 和 E22，Galileo 其余卫星上其他搭载的都是氢钟(Passive Hydrogen Maser, PHM)，其性能与 GPS Block IIF 上搭载的最新 Rb 钟相当(Montenbruck, 2017)。得益于良好的卫星钟差性能，虽然 Galileo 广播星历轨道精度不如 GPS，但其空间信号精度甚至好于 GPS，达到 0.47m（扣除 E24 后为 0.34m），与最新的评估结果相当(Montenbruck, 2017)。

表 4.5 Galileo 广播星历误差及空间信号精度统计（单位：m）

PRN	R	A	C	Clk	R-Clk	SISURE	SISURE_orb
1	0.22	0.35	0.26	0.22	0.19	0.19	0.26
2	0.20	0.33	0.26	0.23	0.35	0.35	0.26
8	0.33	0.55	0.21	0.29	0.26	0.27	0.22
9	0.29	0.44	0.19	0.32	0.23	0.24	0.20
11	0.63	1.44	0.40	0.51	0.39	0.44	0.44
12	0.66	1.16	0.31	0.41	0.29	0.34	0.35
19	0.73	1.65	0.36	0.53	0.44	0.50	0.42
22	0.32	0.57	0.21	0.32	0.30	0.31	0.22
24	0.32	0.48	0.22	1.95	1.78	1.78	0.23
26	0.37	0.79	0.25	0.64	0.51	0.52	0.27
30	0.33	0.59	0.26	0.35	0.22	0.23	0.27
平均 1	0.40	0.76	0.27	0.52	0.45	0.47	0.28
平均 2	0.41	0.79	0.27	0.38	0.32	0.34	0.29

同样统计 Galileo 卫星的每月 R-Clk 均值，图 4.7 为 Galileo 卫星 R-Clk 的每月均值及标准差变化趋势。可以看到，E24 存在系统性偏差，且该偏差较为稳定，其它 Galileo 卫星的 R-Clk 与 GPS 相当。

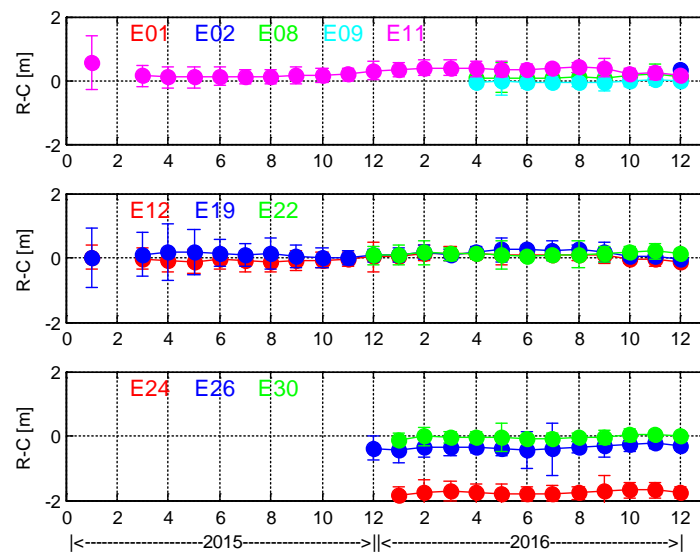


图 4.7 Galileo 卫星 R-Clk 误差变化趋势

4.2.4 BDS

为重点分析北斗，从 gbm 有 BDS 精密星历的 2014 年 2 月开始，统计其至 2016 年 10 月 27 日共近三年的广播星历误差。需要注意的是，C15 (IGSO) 卫星从 2016 年 5 月开始工作，2016 年 10 月 11 日后 C15 编号改为 C13(IGSO)，替代原来一直处于不健康状态的 C13(MEO)，因此 C13 和 C15 实际上是同一颗卫星，在计算时将两者合并，统一归为现在的 C13(IGSO)。如未特别说明，后文中的 C13 既是现在的 C13，也指原来的 C15。

图 4.8 为 GEO、IGSO、MEO 三种不同类型卫星的广播星历在 R、T、N 三个方向上的轨道误差、钟差误差及空间信号精度的变化情况。由图中可以看出，GEO 卫星轨道误差最大，IGSO 和 MEO 误差相当。总体来说，各卫星切向误差最大，C01 卫星在 2014 年 2 月至 8 月的切向误差甚至超过 20m，而径向误差最小，这符合北斗卫星区域定轨的特性。同时，从图中可以看出，部分卫星钟差误差存在系统性偏差。

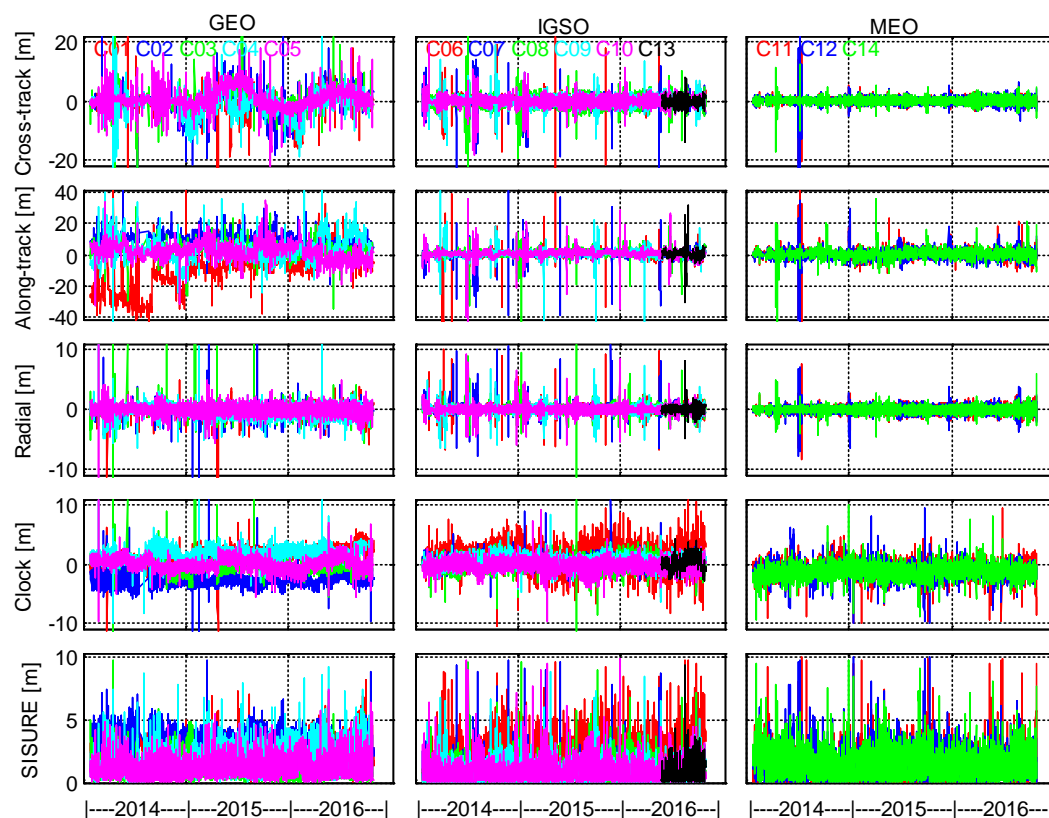


图 4.8 BDS 卫星广播星历误差及空间信号精度变化

表 4.6 为 2014 年 2 月至 2016 年 10 月间 BDS 各卫星及不同类型卫星的广播星历误差及空间信号精度统计结果。可以看到，与其他系统相比，BDS 无论轨道还是钟差误差，均明显差于 GPS 和 Galileo，轨道误差也差于 GLONASS，但钟差误差精度好于 GLONASS，这也验证了 BDS 卫星上的钟的稳定性优于 GLONASS，大致与 GPS Block IIR 上的 Rb 钟相当(Montenbruck, 2017)。不论何种类型卫星，钟差误差都明显大于径向误差，因而可以推断北斗钟差误差是影响用户定位精度的主要因素。

总体来看，BDS 广播星历空间信号精度为 1.55m，优于 GLONASS。其中

GEO、IGSO、MEO 不同类型卫星空间信号精度 RMS 统计值分别为 2.05m、1.14m、1.53m，与 Montenbruck 的结果(Montenbruck, 2015a; Montenbruck, 2017)相比，本文结果更好。GEO 卫星空间信号精度较差是由于其为静止卫星，几何构型不变，导致 GEO 卫星区域定轨精度较低。MEO 较 IGSO 差一些是因为目前北斗监测网仍然是区域监测网，监测站在中国境内一天对 MEO 卫星可见性仅为几个小时，不可见时段的星历依赖于轨道和钟差的预报，当时钟数据龄期(Age of data, clock, AODC)过长时，可能会导致卫星钟差预报误差增大。

表 4.6 BDS 广播星历误差及空间信号精度统计（单位：m）

卫星	R	A	C	Clk	R-Clk	SISURE	SISURE_orb
1	3.22	15.69	0.79	1.78	1.94	2.40	1.63
2	4.29	11.25	0.82	2.84	2.70	2.91	1.36
3	2.91	5.39	0.86	1.12	1.21	1.33	0.99
4	4.02	8.10	0.98	1.94	2.23	2.37	1.25
5	3.43	5.72	0.79	0.90	1.13	1.27	0.97
6	1.65	2.72	0.68	1.74	1.83	1.85	0.64
7	1.93	2.96	0.70	0.68	0.90	0.95	0.70
8	2.19	2.89	0.70	0.68	0.94	0.99	0.75
9	1.54	2.56	0.62	0.77	0.97	1.00	0.63
10	1.68	2.69	0.66	0.68	0.91	0.95	0.69
13	1.51	2.44	0.60	0.87	1.08	1.11	0.57
11	1.18	3.00	0.56	1.21	1.30	1.37	0.67
12	1.17	2.85	0.54	1.54	1.59	1.64	0.63
14	0.94	2.83	0.50	1.51	1.54	1.59	0.62
GEO	3.57	9.23	0.85	1.71	1.84	2.05	1.24
IGSO	1.75	2.71	0.66	0.90	1.11	1.14	0.66
MEO	1.10	2.89	0.53	1.42	1.48	1.53	0.64
平均	2.26	5.08	0.70	1.30	1.45	1.55	0.66

另外，由于BDS在比较卫星钟差时需要进行TGD改正，而目前IGS基于全球MGEX观测网数据，提供了BDS不同频点间的DCB改正(Montenbruck, 2014; Wang N, 2016)，该值与广播星历中的TGD并不一样⁹³。使用IGS的DCB计算BDS广播星历误差及空间信号精度，其结果见表 4.7。可以看出使用IGS提供的DCB之后，钟差精度明显提高，广播星历的精度也由 1.55m提高至 1.29m。下一节将对这一现象进行进一步分析。

表 4.7 DCB 改正后的 BDS 广播星历误差及空间信号精度（单位：m）

卫星	Clk	R-Clk	SISURE
GEO	1.19	1.32	1.60
IGSO	0.80	1.00	1.04
MEO	0.99	1.12	1.20
平均	0.99	1.15	1.29

与其他系统处理类似，图 4.9 给出了 BDS 各卫星 R-Clk 的每月均值及标准

⁹³ <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/products/mgex/dcb/>

差变化趋势。表 4.8 为各卫星所有月份 R-Clk 的均值和标准差。

从图 4.9 和表 4.8 可以看出, C01、C02、C04、C06 卫星的 R-Clk 均值明显大于其他同类型卫星, 同时 C02 卫星的误差方向与 C04 相反, MEO 卫星中 C12、C14 的均值也较大。从图中变化趋势可以看出, 各卫星的 R-Clk 均值除了噪声, 还存在大小各异的系统性偏差。

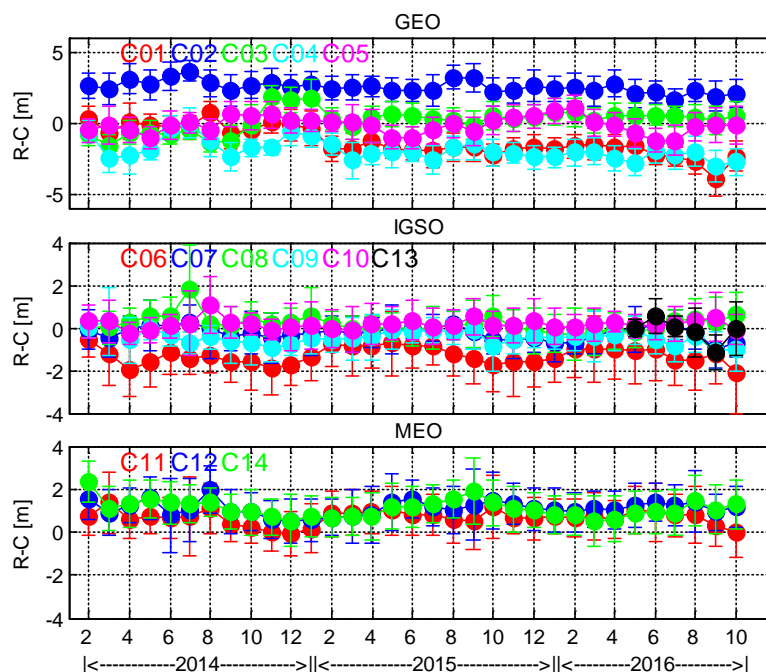


图 4.9 BDS 卫星 R-Clk 误差变化趋势

表 4.8 BDS 卫星 R-Clk 均值及标准差 (2014.02~2016.10)

Sat	Mean±STD(m)	Sat	Mean±STD(m)	Sat	Mean±STD(m)
1	-1.31±1.37	6	-1.25±1.32	11	0.69±1.11
2	2.52±1.03	7	-0.19±0.82	12	1.12±1.15
3	0.19±1.20	8	0.19±0.92	13	-0.75±0.85
4	-1.86±1.17	9	-0.42±0.83	14	1.13±1.09
5	-0.14±1.11	10	0.20±0.88		

4.3 北斗广播星历偏差分析

从上一节分析结果可以看出, GLOANSS、Galileo 的 E24 和 BDS 广播星历中都存在系统性的均值偏差。本节以 BDS 为例, 对该偏差进行分析。

4.3.1 计算策略

北斗广域增强系统在广播星历轨道和钟差参数的基础上, 利用区域监测网的数据计算差分改正数, 能够实时消除广播星历轨道和钟差所产生的系统性误差, 经差分改正后的用户差分距离误差(User Differential Range Error, UDRE)优于

0.5m(Cao Y, 2012)。理论上经过广域差分修正后,广播星历应该不存在大的偏差。

为了研究北斗广播星历是否还存在一些固定偏差,本节利用北斗广域差分改正数进行进一步分析。选取对北斗卫星可视性较好的一共 18 个 MGEX 监测站,对 2016 年年积日从 200 到 296 共 97 天的数据进行单点定位,定位时固定站坐标,计算各个频点定位后的伪距观测值残差。计算时北斗轨道和钟差利用北斗广域差分改正数进行修正,由于北斗广播星历轨道实际上是基于卫星质心,因此未作 PCO 改正。不同频点的电离层误差用 IGS 电离层格网模型改正,对流层延迟采用模型改正,数据采样率为 150s,卫星截止高度角为 10° ,其余各项误差改正采用常规模型进行改正。监测站分布见图 4.10,图中红色圆形点用于伪距残差计算,蓝色三角形点用于后面的定位验证。

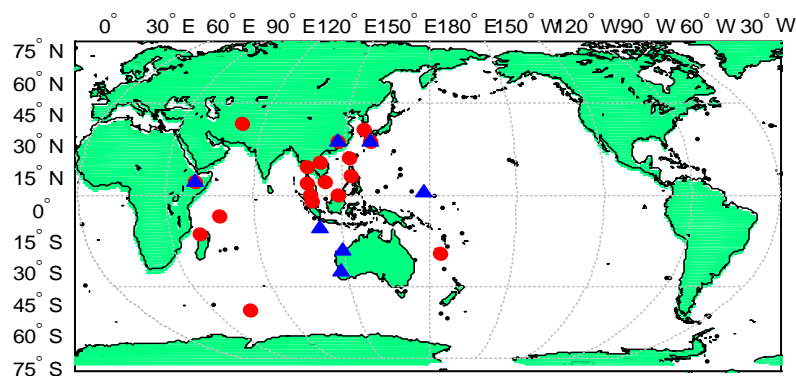


图 4.10 MGEX 监测站 (红色: 估计广播星历偏差; 蓝色: 定位验证)

4.3.2 北斗广播星历偏差计算

对 2016 年年积日 200 至 296 的数据进行处理,获取定位后的伪距残差,将各站的伪距残差按照每天进行统计,计算每天各卫星对所有观测站的伪距残差的均值及标准差。图 4.11 是 B1 频点不同卫星的伪距残差随时间的变化趋势,其中误差棒表示每天的标准差。

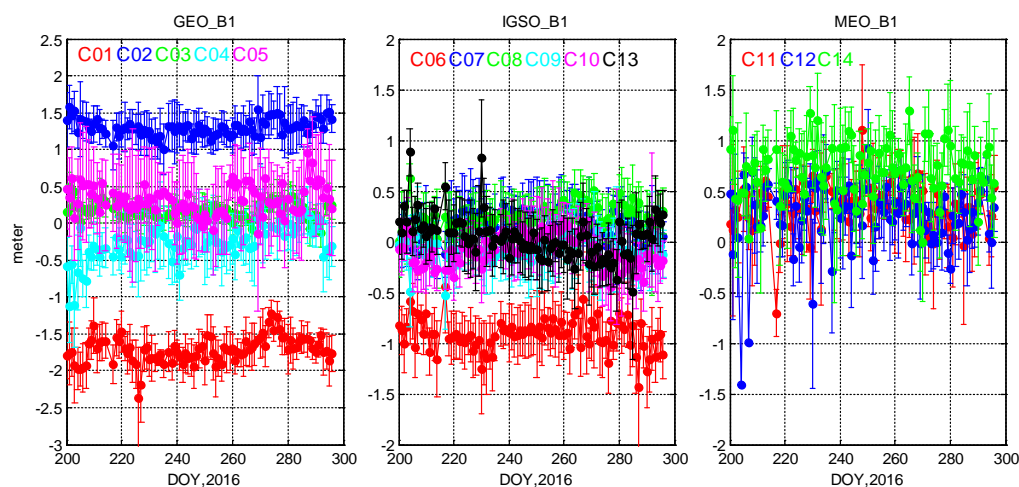


图 4.11 B1 频点伪距残差变化单天均值及其标准差

从图 4.11 可以看出, 基于北斗广播星历和广域差分改正数计算的伪距残差均值存在系统偏差, 且该偏差变化较为平稳, 我们把这种偏差称为广播星历偏差 (Broadcast Ephemeris Bias, BEB)。

基于以上结果, 统计了所有卫星不同频点的广播星历偏差及其标准差, 见表 4.9。结合图 4.11, 可以看到, C01、C02、C06 的 BEB 值较大, 其他卫星都在 0.5m 内。

表 4.9 各卫星不同频点广播星历偏差值

Sat	Bias \pm STD(m)			Sat	Bias \pm STD(m)		
	B1	B2	B3		B1	B2	B3
1	-1.72 \pm 0.31	-1.19 \pm 0.42	-1.19 \pm 0.22	8	0.22 \pm 0.29	0.16 \pm 0.40	-0.08 \pm 0.32
2	1.30 \pm 0.28	0.56 \pm 0.38	0.77 \pm 0.34	9	-0.08 \pm 0.29	0.24 \pm 0.36	-0.02 \pm 0.31
3	0.18 \pm 0.19	-0.02 \pm 0.29	0.19 \pm 0.28	10	-0.10 \pm 0.32	-0.20 \pm 0.43	0.01 \pm 0.42
4	-0.25 \pm 0.43	0.11 \pm 0.62	0.10 \pm 0.34	11	0.36 \pm 0.41	0.42 \pm 0.55	0.01 \pm 0.49
5	0.31 \pm 0.59	0.40 \pm 0.75	0.16 \pm 0.80	12	0.29 \pm 0.43	0.26 \pm 0.54	0.02 \pm 0.52
6	-0.92 \pm 0.31	-0.59 \pm 0.42	-0.80 \pm 0.32	13	0.04 \pm 0.36	0.17 \pm 0.45	0.36 \pm 0.28
7	0.17 \pm 0.30	0.09 \pm 0.40	-0.15 \pm 0.43	14	0.71 \pm 0.47	0.42 \pm 0.61	0.23 \pm 0.62

另外, 从表 4.9 中可以看到不同频点的 BEB 值并不一样, 推测其可能与卫星 TGD 有关。IGS 发布的 BDS DCB 与广播星历中的 TGD 相减得到的 dTGD(differential TGD), 并与本文中获取的 BEB 进行比较。为了统一基准, 扣除二者所有卫星的均值。图 4.12 显示了 B1B2 无电离层组合的 BEB 和 dTGD 的比较结果。从图中可以看出, 大部分卫星的差异较为接近。采用线性回归分析, 计算其相关系数, 二者达到 0.88, 这说明 BEB 和 dTGD 之间相关性很大, 推测可能是由于北斗监测站接收机与 IGS 监测站接收机对相同卫星的通道时延标定不一致, 导致北斗广播星历 TGD 用于 IGS 监测站接收机时存在偏差, 但仍需进一步深入研究。

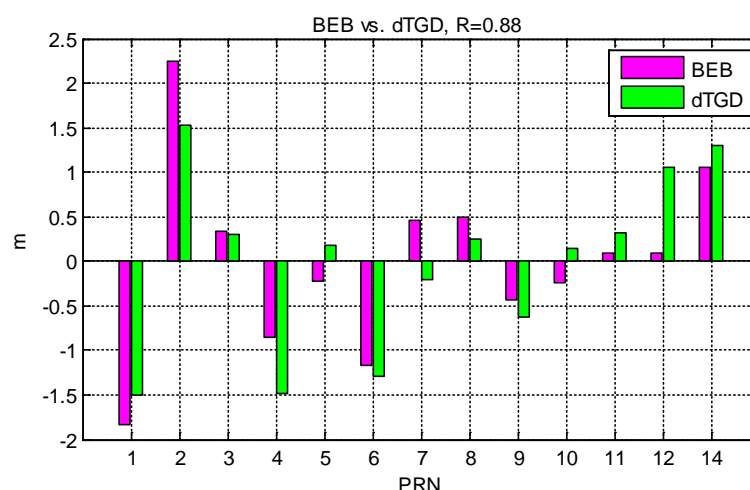


图 4.12 BEB 与 dTGD 比较

4.4 北斗广播星历偏差应用

为了验证本文给出的 BEB 的定位效果, 采用不同时间、不同站的数据进行单点定位验证。选取 2015 年 12 月 27 日~2016 年 1 月 9 日共 14 天的 7 个 MGEX 站数据, 测站分布见图 4.10 蓝色点位。其中 KARR、NNOR、POHN、XMIS 四个站在计算伪距偏差时并没有用到。NNOR 接收机类型为 SEPT POLARX4, 其他均为 TRIMBLE NETR9。定位时采用北斗广播星历, 将各频点的 BEB 改正到广播星历 TGD 参数上:

$$\text{TGD}_i^{\text{new}} = \text{TGD}_i + \text{BEB}_i \quad (4.5)$$

式中 $\text{TGD}_i^{\text{new}}$ 为频点 i 上新的卫星 TGD 改正。

对这些站进行伪距单点定位, 观测值采用 B1B2 无电离层组合, 对流层延迟采用模型改正, 数据采样率为 30s, 卫星截止高度角为 10° 。将 IGS 给出的精密坐标作为真实坐标, 比较 BEB 改正前后的定位结果差异。

图 4.13 是 GMSD 测站在 2016 年 1 月 1 日这一天的单点定位结果比较。其中左图为常规定位的结果, 右图为增加 BEB 改正后的定位结果。表 4.10 给出了各个站 14 天的动态定位 RMS 比较。

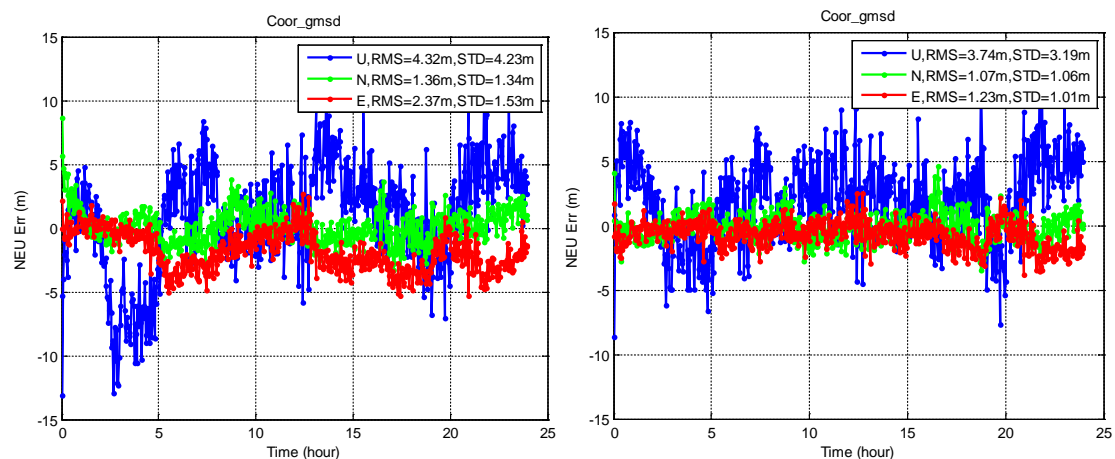


图 4.13 广播星历偏差改正前后定位精度比较 (GMSD): 左为改正前, 右为改正后

表 4.10 各站改正广播星历偏差前后定位结果比较

站	未改正 BEB			改正 BEB			提高百分比		
	N(m)	E(m)	U(m)	N(m)	E(m)	U(m)	N(%)	E(%)	U(%)
DJIG	3.37	8.46	9.65	2.65	5.65	6.44	21.3	33.2	33.3
GMSD	1.76	2.44	4.23	1.23	1.48	3.71	30.2	39.4	12.4
JFNG	1.73	2.33	4.03	1.24	1.36	3.38	28.1	41.7	16.1
KARR	2.01	2.39	3.50	2.01	1.82	3.17	0.0	23.9	9.3
NNOR	2.24	2.41	3.54	2.01	1.52	3.28	10.3	37.1	7.4
POHN	2.65	5.45	6.13	2.42	4.85	6.07	8.5	10.9	1.0
XMIS	1.70	2.32	3.49	1.59	1.78	3.16	6.6	23.3	9.5
Mean	2.21	3.68	4.94	1.88	2.64	4.17	14.9	28.4	15.5

从以上定位结果可以看出,北斗广播星历偏差能改善定位精度,在 N、E、U 方向上的提高程度分别为 14.9%、28.4%和 15.5%,东西方向改善最明显,这可能是由于 GEO 卫星 BEB 改正值比其他卫星大,且 GEO 卫星纬度相同,因而对东西方向改善最大。同时,北斗广播星历偏差对于不同时间,不同观测站,不同接收机,都能改进其定位效果,这说明 BEB 与时间、接收机无关,更有可能是北斗广播星历不同卫星的系统性偏差造成的(如卫星 TGD 或者系统监测站的通道时延误差)。

为了进一步分析 BEB 对定位的影响,图 4.14 给出了 2016 年 1 月 1 日 GMSD 站 BEB 改正前后不同卫星的伪距单点定位残差的 RMS 及 STD 比较。可以看到个别卫星(C01,C02,C04,C08,C14)原始伪距残差较大,这主要是广播星历偏差造成的。而改正后的各卫星定位残差 RMS 相近,约为 1m 左右。从 STD 来看,二者没有太大区别,这也验证了改正的广播星历偏差是系统性的。

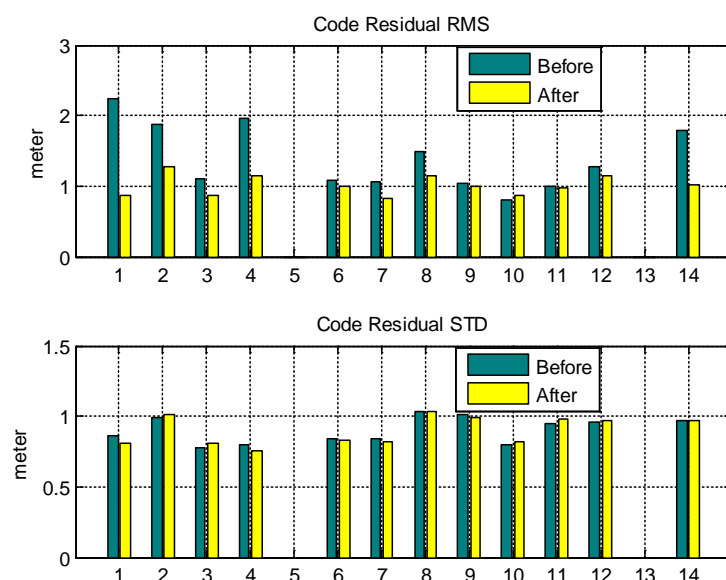


图 4.14 BEB 改正前后各卫星定位残差的 RMS 和 STD 统计

为了进一步验证本文计算的 BEB 对一般用户接收机的适用性,选取司南卫星导航的 T300 GNSS 接收机数据,该数据采集于上海嘉定区,跨度由 2016 年 11 月 26 日至 2016 年 12 月 15 日共 20 天。采用同样方法,将本文计算的 BEB 应用于其伪距定位中,比较改正 BEB 前后的定位结果差异。定义未改正 BEB 的结果为 A,改正 BEB 的定位结果为 B,图 4.15 为两种模式每天的定位结果在三个方向上的定位误差比较。可以看到,改正 BEB 后,平均定位精度在 N、E、U 三个方向上由 1.63m、1.80m、3.67m 改善至 1.48、1.12m、3.27m。可见 BEB 改正同样能提高普通用户接收机定位效果,同样在 E 方向改善最大。

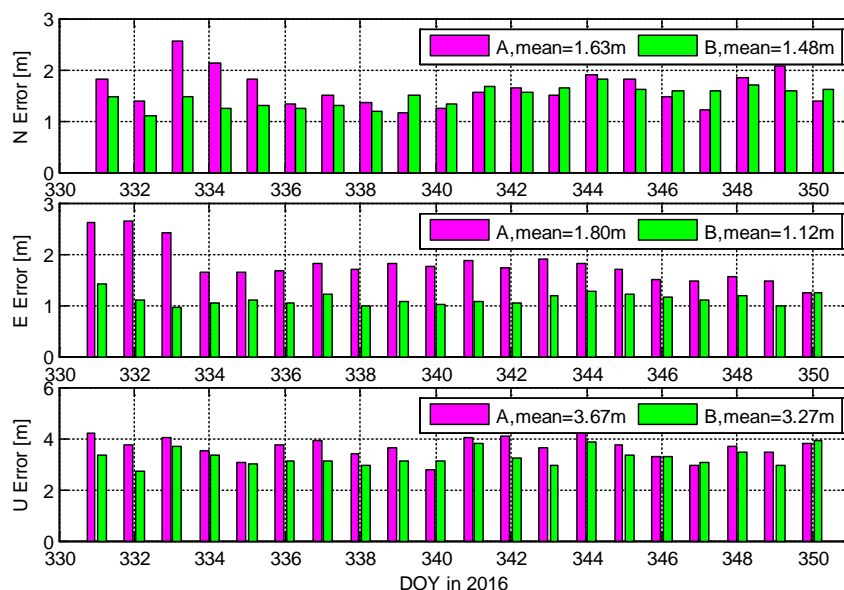


图 4.15 广播星历偏差改正对一般用户接收机的定位改进

4.5 本章小结

本文对两年的 GPS、GLONASS、Galileo 和近三年的 BDS 广播星历误差进行分析, 得出以下结论:

(1) GPS 和 Galileo 广播星历空间信号精度最高, 分别达到 0.6m 以内和 0.5m 以内, 这主要得益于 GPS 逐渐增多的 Block IIF 卫星和 Galileo 卫星高稳定性的氢钟。GLONASS 广播星历钟差精度最差, 达到 2.13m, 这主要是由于其钟差性能较差导致的。BDS 广播星历精度则优于 GLONASS, 但与 GPS 和 Galileo 相比仍有差距。其中 GEO 卫星轨道误差最大, IGSO 和 MEO 误差相当, 各卫星切向误差最大, 钟差误差大于径向误差。GEO、IGSO、MEO 卫星广播星历空间信号精度统计结果分别约 2.05m、1.14m、1.53m。

(2) GLONASS、Galileo 中的 E24 和 BDS 各卫星的 R-Clk 均值除了噪声, 还存在大小各异的系统性偏差。

(3) 经广域差分改正数修正的 BDS 广播星历存在系统性偏差, 根据多天多站的解算给出了广播星历偏差的改正值, 且这个偏差变化较为平稳。广播星历偏差与 dTGD 之间的相关性很大, 这可能是由于北斗系统监测站使用的接收机与普通接收机的卫星通道时延标定不一致造成的, 且相同卫星在不同频点不一致。

(4) BDS 广播星历偏差改正能改善用户基本导航定位精度, 且对不同时间和用户接收机类型都有提高。总体来说, 在 N、E、U 三个方向分别提高 14.9%、28.4%、15.5%。伪距定位残差 RMS 也有改善。BEB 改正对普通用户接收机定位也同样有改善。

但本文中计算偏差所采用的数据只有 96 天, 且验证数据与 BEB 计算采用的

数据相距最长只有 200 天左右。从长期来看，这个偏差是否仍是固定的，有待基于长期大量数据的进一步研究。

第5章 北斗广域差分等效钟差估计

为了满足实时高精度用户定位的需求,各导航系统都建立了自己的广域星基增强系统,通过伪距计算实时轨道和钟差改正,典型的如WAAS、EGNOS。一些商业公司也建立了自己的商用星基增强系统,具有代表性的为Trimble的RTX系统⁹⁴,其平面定位精度为4cm,初始化时间为30min(部分地区5min)。Furgo公司的MarineStar系统从2014年开始全面支持北斗实时轨道和钟差改正信息,其GPS/GLONASS/BDS/Galileo四系统组合实时定位精度能达到平面2~3cm(STD),高程10cm(95%)⁹⁵。IGS为满足RTS服务也通过SSR提供实时轨道和钟差改正⁹⁶,目前只有CNES提供北斗的轨道和钟差改正(Rülke, 2016)。与WAAS等系统不同,RTX、MarineStar和RTS的轨道和钟差是利用全球分布的监测站,并通过伪距相位观测值计算得到的,因此其实时轨道和钟差改正精度较高,用户实时PPP定位精度可达厘米级。

然而,受限我国北斗系统监测站区域网的分布,目前北斗系统的广域增强系统只能基于中国境内的监测站和相位平滑伪距观测值计算等效钟差(Equivalent Satellite Clock, ESC)改正数(周善石, 2007; 邢楠, 2013; 曹月玲, 2014),其UDRE约为0.5m(CAO Y, 2012)。本章对影响北斗广域增强系统中等效钟差改正数的因素进行进一步分析。

5.1 等效钟差计算原理

目前北斗系统在其D2导航电文的子帧2的1~6页面中播发卫星完好性和差分信息(BDS ICD, 2016),其中即包含了广域增强中的等效钟差改正数。

由于卫星的轨道径向误差在中国境内的投影差异很小,因此很难将轨道径向误差与卫星钟差完全分离,故将轨道投影误差与钟差误差合并,称为等效钟差(周善石, 2007)。只有当卫星机动时,其法向和切线误差对等效钟差的影响不可忽略(曹月玲, 2014)。等效钟差可以表示为:

$$ESC = \delta_{clk} + \delta_{orb} \quad (5.1)$$

式中, δ_{clk} 为钟差误差, δ_{orb} 为轨道投影误差。

监测站接收机最高数据采样频率为1Hz,并将数据实时传回主控站。对于同一历元的所有监测站,都可以对其观测到的卫星列立形如式(2.23)的伪距观测方程。在等效钟差估计中,由于监测站坐标已知,一般将其固定。对流层误差可以通过气象数据和模型精确改正,电离层误差可以通过双频数据消除。由于认为卫星径向误差和钟差误差无法完全分离,故一般将卫星轨道固定而对等效钟差进行参数估计。这样,在伪距观测方程中,待估参数只有接收机钟差和卫星等效钟差,即:

⁹⁴ <http://www.trimble.com/Positioning-Services/Trimble-RTX.aspx>

⁹⁵ <https://www.fugro.com/our-services/marine-asset-integrity/satellite-positioning>

⁹⁶ <http://www.igs.org/rts>

$$P_i^j = \delta_{rec,i} - \delta_{ESC}^j + \varepsilon_i^j \quad (5.2)$$

式中, P_i^j 为测站 i 对卫星 j 的伪距观测值残差, $\delta_{rec,i}$ 为测站 i 的接收机钟差, δ_{ESC}^j 为卫星 j 的等效钟差。

这样, 对同一个历元每个测站观测到的卫星, 可以建立形如下式的观测模型:

$$\begin{bmatrix} P_1^1 \\ P_1^2 \\ \vdots \\ P_n^1 \\ P_n^2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & -1 & 0 & \cdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & 0 & 1 & -1 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & 1 & 0 & -1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{rec,1} \\ \delta_{rec,2} \\ \vdots \\ \delta_{ESC}^1 \\ \delta_{ESC}^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

需要注意的是, 由于没有时间基准, 上式观测方程中的法方程实际上是秩亏的, 因此一般需要固定某个测站的站钟。

另外, 为了消除伪距噪声的影响, 一般利用相位对伪距进行平滑, 目前北斗广域增强系统采用的相位平滑伪距方法为 CNMC 算法(Wu X, 2012; Cao Y, 2012)。

5.2 等效钟差估计结果分析

通过式(5.3), 就可以实时估计北斗等效钟差。本节在前人研究的基础上, 对影响等效钟差的因素进行分析。

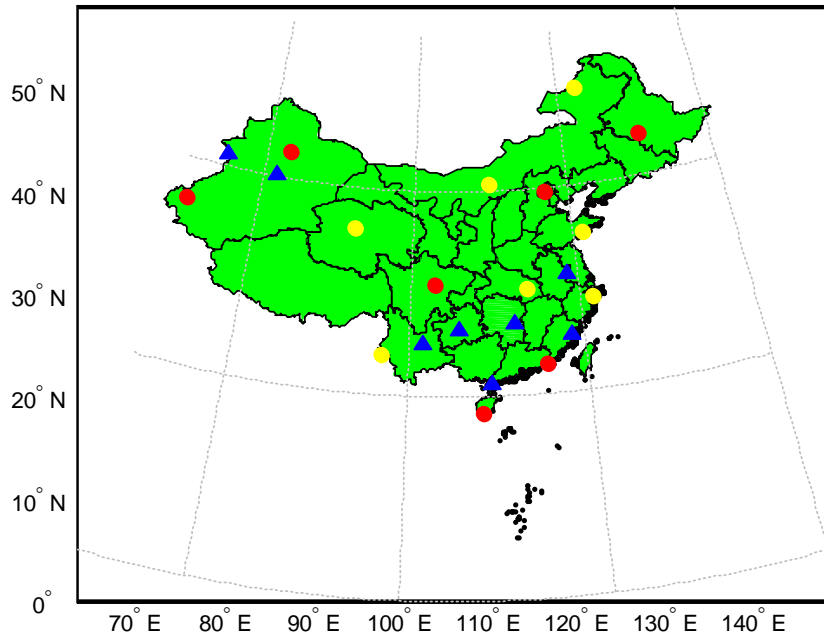


图 5.1 测试站分布

为了进行试验,在全国范围选择 2016 年 DOY 345~347(12 月 10 日至 12 日)共三天的 14 个测站对等效钟差进行估计(见图 5.1 中红色和黄色圆形点位)。另外,为了对等效钟差进行定位验证,选择同一时间内的另外 8 个测站(见图 5.1 中蓝色三角形点位)。

在估计等效钟差时,选择固定有外部时间输入的测站的钟差。如第二章所述,CNMC 与 Hatch 滤波实际上是等价的,因此,下文的等效钟差均为采用双频无电离层组合相位平滑伪距观测值估计的结果。

另外,对 UERE 和 UDRE 进行定义(曹月玲, 2014)。在固定测站真实坐标的情况下,将相位平滑后的伪距观测值精确扣除几何距离及各项误差后得到的伪距残差,称为用户等效距离误差(UERE, User Equivalent Range Error)。

$$UERE^j = \bar{P}^j - \rho^j - \delta_{sat}^j - \delta_{mod\,el}^j \quad (5.4)$$

上式中, \bar{P} 为平滑后的伪距, ρ 为卫星至测站的几何距离, $\delta_{mod\,el}$ 为包含对流层、电离层(双频采用无电离层组合消除,单频采用格网电离层模型改正)、相对论、地球形变改正、接收机钟差(同一测站对所有卫星扣除其均值)在内的各项误差改正。

由此可见, UERE 中包含的误差为卫星轨道投影误差、卫星钟差误差、经平滑后的伪距噪声和多路径残差。

在式(5.4)中加入等效钟差等差分改正信息,得到的伪距残差即为用户差分距离误差(UDRE, User Differential Range Error):

$$UDRE^j = \bar{P}^j - \rho^j - \delta_{sat}^j - ESC - \delta_{mod\,el}^j \quad (5.4)$$

5.2.1 等效钟差估计结果

以 Net_PPP 软件为基础,利用图 5.1 中的 14 个测站对北斗等效钟差进行估计,其中观测值采用 B1B2 双频无电离层组合。

图 5.2 为 2016 年 DOY345 一天内各卫星的等效钟差估计结果。由图中可以看到,等效钟差量级一般在 3m 以内,这与第 4 章中北斗广播星历 R-Clk 误差的量级相近。

对于 GEO 卫星,其等效钟差存在明显的周期变化特征,这是因为北斗卫星轨道参数是利用区域监测网的观测数据进行精密定轨(POD),经广播星历拟合后得到;而卫星钟差参数则是基于星地双向时间比对(TWTT),并进行参数拟合得到(周善石, 2011; 王彬, 2016)。POD 与 TWTT 是两种独立的体制,两者融合成基本广播电文会造成基本导航电文的偏差。等效钟差中的周期性特征即为区域网定轨中未能与钟差完全分离的轨道径向误差,尤其是对地球相对静止的 GEO 卫星(He F, 2014)。

对于 IGSO 和 MEO 卫星,其周期性特征明显减小,说明卫星相对于地球的运动减小了轨道径向和钟差的相关性。但在卫星出入境时,等效钟差明显增大,这是由于卫星出入境时观测数据过少,导致定轨误差变大。

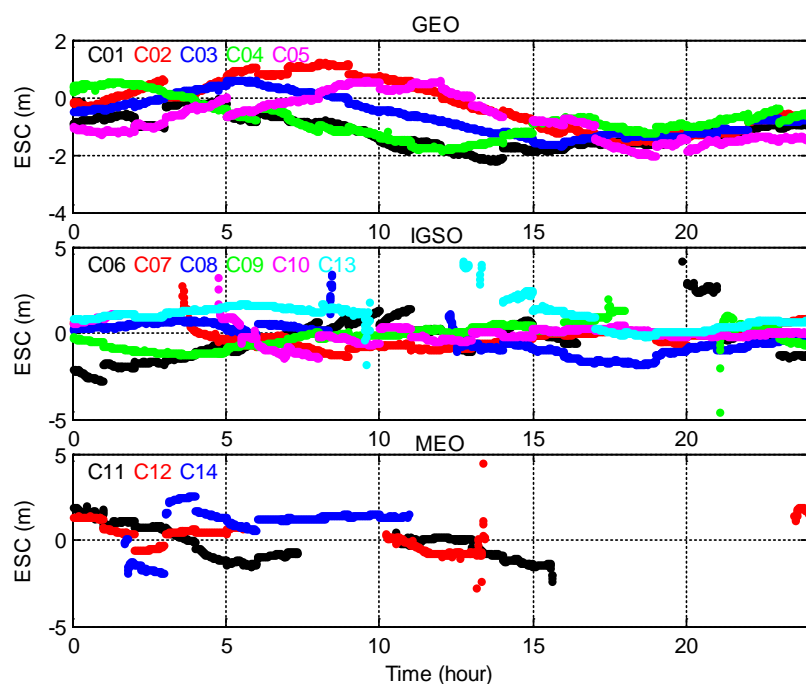


图 5.2 各卫星等效钟差估计结果（从上到下子图依次为 GEO、IGSO、MEO，下同）

以图 5.1 中的 8 个定位测试站为例，计算其 B1B2 频点组合的 UERE 和经等效钟差改正后的 UDRE。为了进一步扣除伪距噪声残差的影响，将所有站的 UDRE 取均值。图 5.3 和图 5.4 分别为 2016 年 DOY345 一天内各卫星的 UERE 和 UDRE。可以看到经等效钟差改正后的用户距离误差明显减小。

图 5.5 给出了 2016 年 DOY345~347 三天的 UDRE 和 UERE 统计结果。可以看到用户距离误差由 0.91m 降至 0.26m。与 Cao 的结论相比(Cao, 2012), UDRE 小于 0.5m，这可能与本文选用的数据时间长度太少有关。

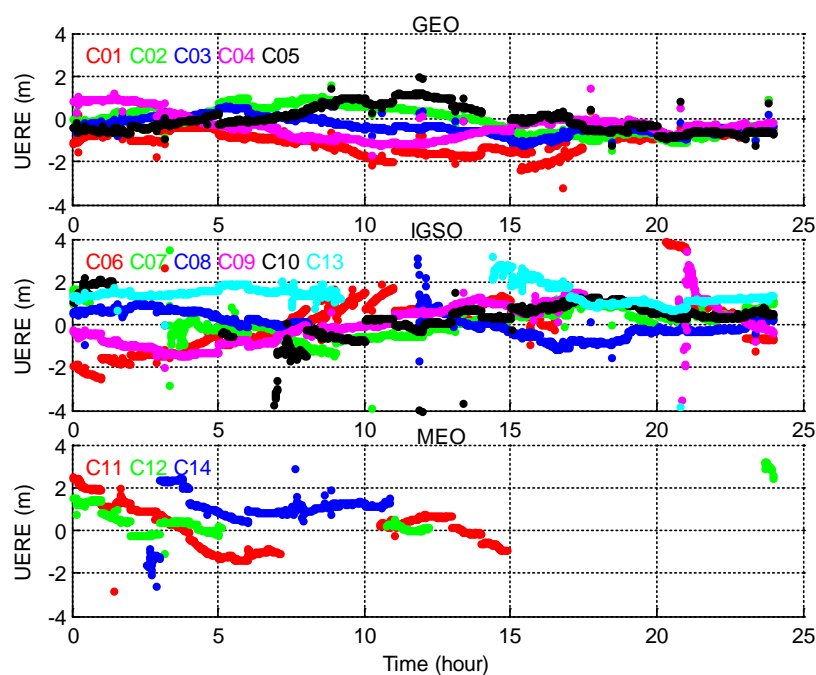


图 5.3 各卫星 UERE 统计结果

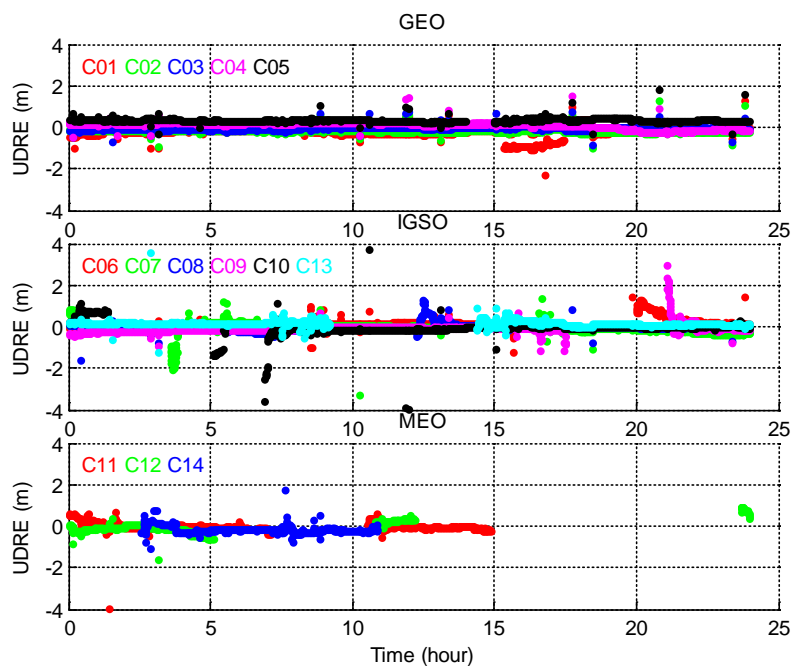


图 5.4 各卫星 UDRE 统计结果

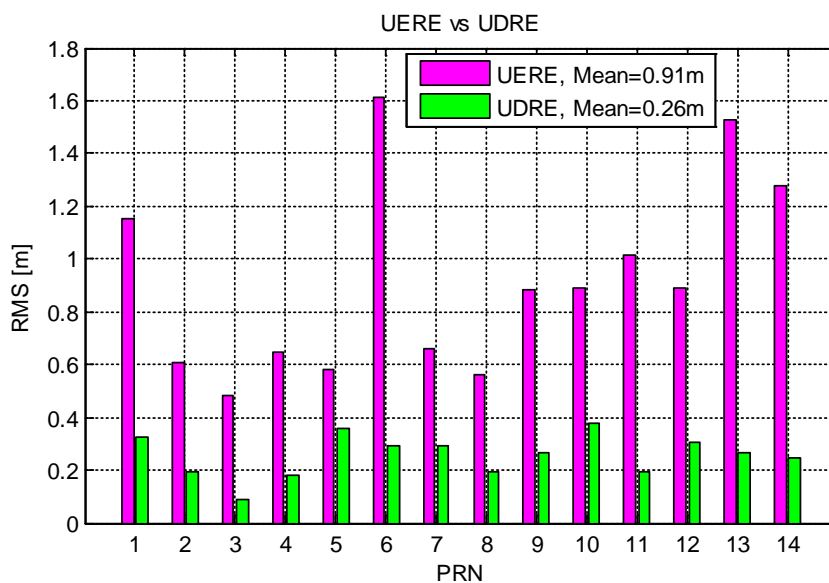


图 5.5 各卫星 UERE 和 UDRE 比较结果

将等效钟差用于图 5.1 中的 8 个测试站定位，统计其伪距定位误差，并与未使用等效钟差的定位误差进行比较。定位时均采用 B1B2 双频相位平滑伪距。图 5.6 为 2016 年 DOY345 两者在各个站的三维定位精度结果比较。可以看到改正等效钟差后，平均定位误差由 3.11m 提高至 1.22m，提高了约 60%。可见等效钟差改正对用户增强导航定位的帮助。

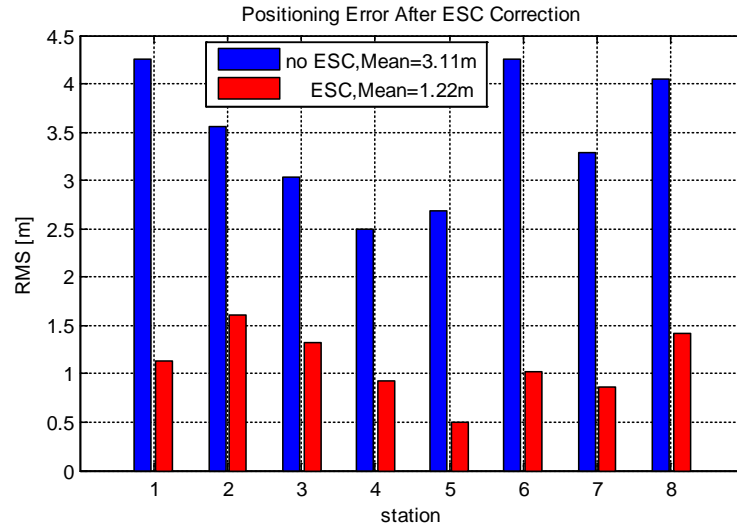


图 5.6 等效误差改正前后的定位精度比较

5.2.2 测站数对等效钟差的影响

为了测试测站数目对等效钟差计算结果的影响,选取 14 个测站中的 7 个(见图 5.1 中的 7 个红色圆形点位),采用相同的方法计算广播星历等效钟差,分别计算经等效钟差改正后的 UDRE。图 5.7 为经 14 个测站和 7 个测站计算的等效钟差改正后的用户各卫星上的 UDRE 比较结果,由图中可见二者在不同卫星上大小各有差异,但在所有卫星的均值上差异不大。这是因为 7 个测站的分布较为均匀,14 个测站更多是作为数据补充和加密作用。

将 14 个测站和 7 个测站计算的等效钟差分别用于 B1B2 双频伪距定位中,图 5.8 为各个站三天的三维定位误差均值差异,可以看到两种等效钟差在不同用户站上的定位结果各有差异,所有站的三维定位误差均值分别为 1.22m 和 1.29m,对于伪距定位来说,该差异可以忽略。这说明只要测站选择合理,增加测站数目并不会提高等效钟差精度。

后面的分析中为避免赘述,其结果均为采用 14 个测站计算的等效钟差。

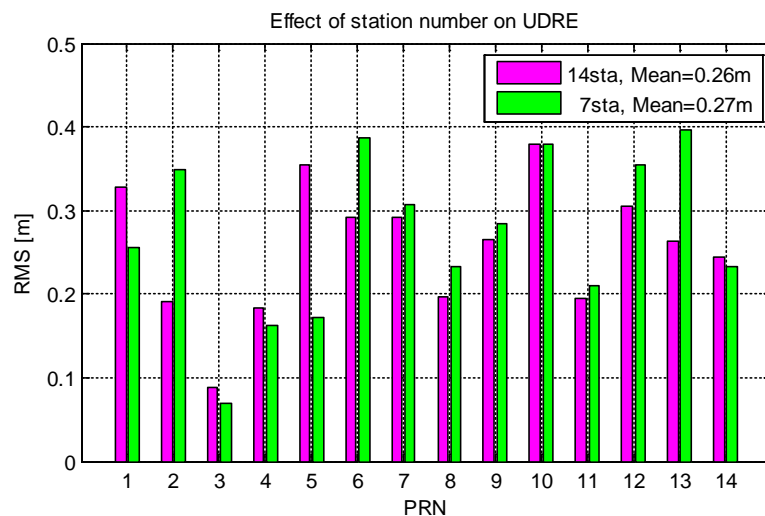


图 5.7 不同测站数目计算的等效钟差的 UDRE 差别

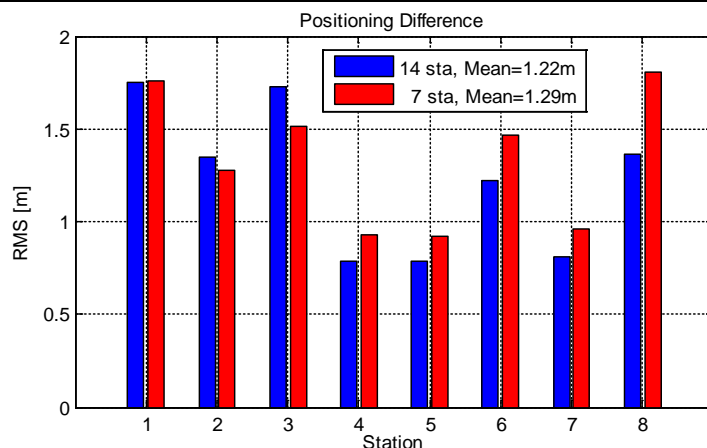


图 5.8 不同测站数目计算的等效钟差的定位误差比较

5.2.3 频率组合对等效钟差的影响

理论上, 等效钟差改正的是卫星轨道投影误差和钟差误差, 因此与频率应该没有关系。为了检验这一结论是否合理, 分别采用 B1B2 组合和 B1B3 组合观测值计算等效钟差。图 5.9 为两种组合的数据计算得到的各卫星等效钟差的差异, 由图中可见该差异一般在 0.5m 以内, 在卫星出入境时差异变大。另外可以看到各卫星上该差异变化较为稳定。这说明该差异除了与 B1B2、B1B3 的噪声有关外, 可能还与卫星和测站的 DCB 在不同频点上的误差有关。

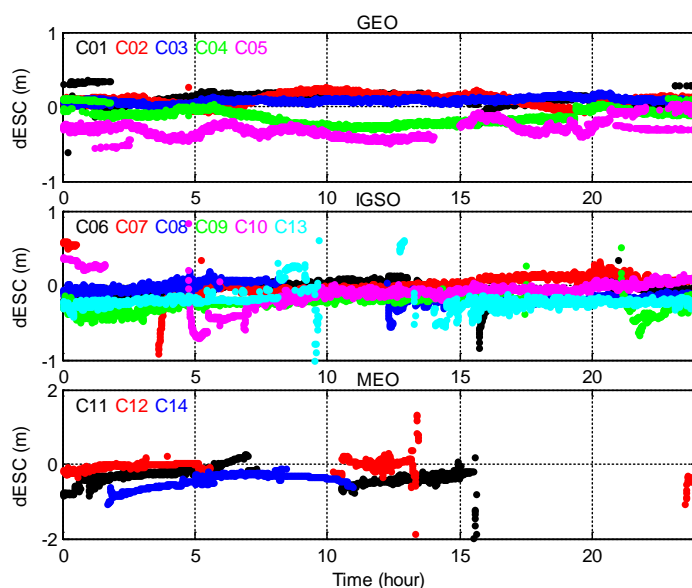


图 5.9 B1B2 和 B1B3 组合计算的各卫星等效钟差差异

为了验证这一点, 对三天计算的差异结果进行了统计。经比较发现三天所有卫星差异的均值为 0.11m, 该值可能与固定钟差的测站上标定的 DCB 不准确有关, 该差异可在用户定位时被用户接收机钟差吸收。图 5.10 给出了扣除均值差异后各卫星 B1B2 和 B1B3 频点的等效钟差连续三天的均值差异。由图可见各卫星上差异变化趋势相同, 这说明该差异可能是由于卫星 TGD 在不同频点上标定不准确有关。经统计, 所有卫星的标准差为 0.14m, 目前我国北斗卫星的 TGD

精度约为 1ns(Xing N, 2012)，二者水平相当。

后面的分析中为避免赘述，其结果均为采用 B1B2 频点计算的等效钟差。

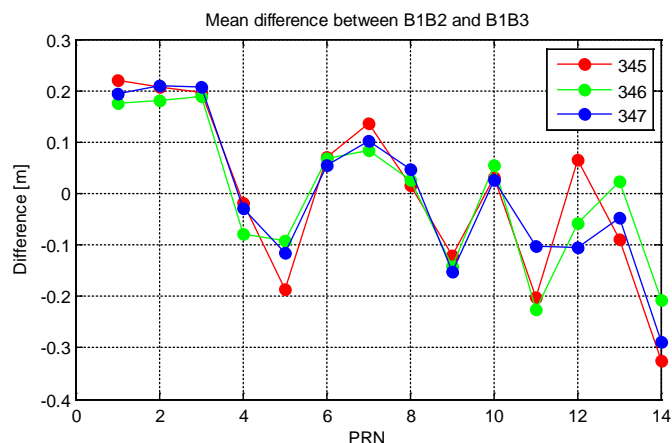


图 5.10 B1B2 和 B1B3 组合计算的等效钟差偏差均值

5.2.4 轨道精度对等效钟差的影响

如前所述，受限于我国北斗系统监测站区域网的分布，其轨道精度较差。由前面分析可知，轨道径向误差在中国的投影差异很小，大部分可被等效钟差吸收。但轨道切向和法向误差是否会对等效钟差的计算产生影响？

为了研究该影响，选择轨道精度较高的 *gbm* 精密轨道，将其轨道固定，钟差仍采用广播星历中的钟差，估计其等效钟差。图 5.11 为使用广播星历轨道和 *gbm* 精密轨道估计的等效钟差差异（其中 C10 在该天无精密轨道），可以发现二者估计的等效钟差的差异存在明显的周期性变化趋势，这可能是目前北斗广播星历使用的区域监测网络，而 *gbm* 精密轨道则采用全球观测网络，二者的轨道中吸收的卫星钟差存在周期性差异。

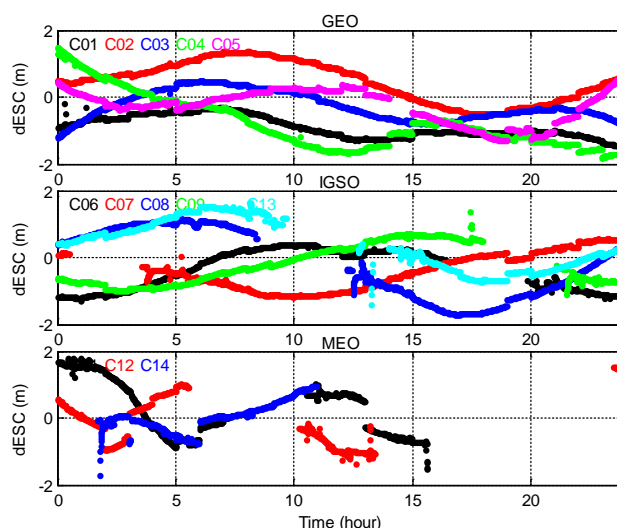


图 5.11 使用广播星历轨道和 *gbm* 精密轨道估计的等效钟差差异

将两种模式计算得到的等效钟差分别用于计算用户 UDRE。其中使用 *gbm* 精密轨道计算的等效钟差时，为了保持一致性，用户也使用 *gbm* 精密轨道。图 5.12 为两者计算得到的各卫星 UDRE 比较，由图中可发现二者的 UDRE 差异很

小。这是因为导航卫星经过长期的模型精化,轨道动力学模型已经非常成熟,短期轨道预报能达到很高的精度(崔红正, 2015),因而等效钟差精度更多是受区域监测网络的限制和伪距观测误差的影响。但研究表明,当卫星机动时,其轨道误差达到 km 级别以上,此时轨道切向和法向误差对等效钟差的影响不可忽略,除了计算等效钟差,还需计算轨道三维误差改正(曹月玲, 2014)。

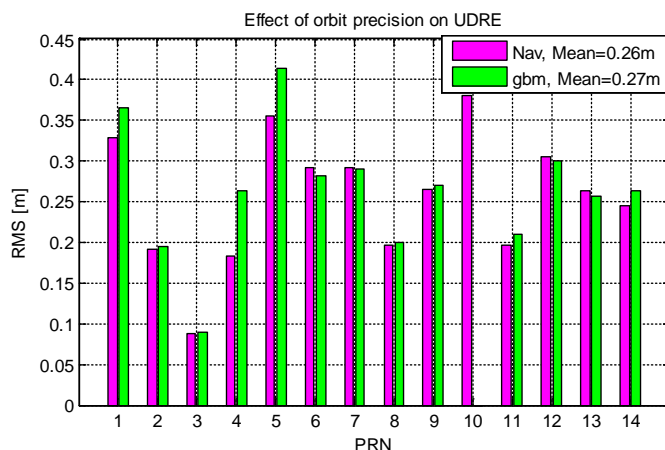


图 5.12 使用广播星历轨道和 gbm 精密轨道估计的等效钟差对 UDRE 的影响

5.2.5 等效钟差对精密定位的影响

由 5.2.1 可知,经等效钟差改正后的用户 UDRE 可达到 0.3m,这样的精度可以应用于用户精密定位中。为了验证等效钟差在精密定位中的应用,将等效钟差用于伪距+相位精密定位中。根据各误差精度差异,将相位和伪距误差方程权重设为 1:0.3。

图 5.13 为使用等效钟差改正后的伪距定位和伪距+相位精密定位的三维误差比较结果。可以看到定位平均精度由 1.22m 提高至 0.79m。可见使用等效钟差后,只要选择合适的权重,用户精密定位精度优于伪距定位精度。

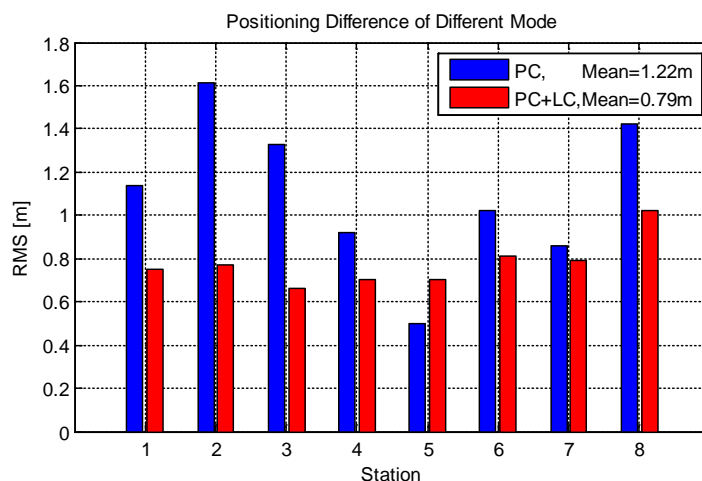


图 5.13 伪距与伪距相位定位结果比较

5.3 本章小结

本章介绍了目前北斗广域增强系统中等效钟差的计算原理和方法,通过实测数据分析了等效钟差的量级和变化情况,并将其用于用户定位中,对影响等效钟差的相关因素进行了分析,得出以下结论:

(1) 区域监测网定轨中未能将轨道径向误差和卫星钟差很好分离,由于目前北斗广播星历的卫星钟差为采用 **TWTT** 计算的钟差,因此等效钟差中除了包含卫星钟差预报误差,还有效地补充了区域网定轨中未能与钟差完全分离的轨道误差。

(2) 经等效钟差改正后的用户距离误差由 **0.91m** 降至 **0.26m**,用户平均定位误差可由 **3.11m** 提高至 **1.22m**。

(3) 在区域监测网范围内,只要测站选择合理,增加测站数目并不会提高等效钟差精度。

(4) 等效钟差与卫星频率无关,但不同频率上的 **TGD/DCB** 精度会导致等效钟差存在系统性偏差。

(5) 在区域监测网范围内,轨道误差会被等效钟差吸收,对用户定位的影响不大。

(6) 等效钟差可用于用户精密定位中,只要权重选择合理,精密定位精度优于伪距定位精度,可达亚米级。

第6章 北斗分区综合改正数

北斗卫星导航系统为用户提供基本导航和增强导航两种服务方式(BDS ICD, 2016)。其中基本导航服务能达到亚太地区用户定位精度优于 10m, 测速精度优于 0.2m/s, 授时精度优于 20ns的PNT需求⁹⁷。而增强导航服务则是通过GEO卫星广播差分和完好性信息, 以实现更高精度的星基增强定位服务。

北斗原有的星基增强参数主要是等效钟差改正数和格网电离层改正数, 并通过广播 D2 导航电文实时播发给用户。其中, 等效钟差除了包含卫星钟差改正之外还包含了卫星轨道的径向误差改正(陈刘成, 2010; Cao Y, 2012; Xing N, 2013)。基于北斗现有的增强参数, 用户可以进行增强定位。研究表明, 基于北斗广播星历和广域差分信息能实现双频伪距用户定位精度提高 50%, 单频伪距用户定位精度提高 30%, 但总体而言, 其三维定位精度仍大于 1m(Cao Y, 2012)。

考虑到国际竞争的加剧以及系统更高的服务性能的需求, 北斗系统开通服务之后, 系统持续进行了空间信号精度提升以及分米级星基增强系统的研究工作。其中, 空间信号精度提升不对电文格式进行变动, 通过提高电文参数的精度来提升系统的性能; 分米级星基增强系统则在空间信号性能提升的基础上, 通过新增轨道改正信息, 实现用户定位精度的进一步提升。

然而, 以上广域差分信息并没有完全利用高精度相位信息, 用户差分距离误差(User Differential Range Error, UDRE)仍然达到 0.5m(Cao Y, 2012), 这必然限制高精度用户实时定位的应用。

基于以上背景, 我国改造的北斗广域分米级星基增强系统提出了分区改正数的概念, 利用高精度相位观测值计算分区综合改正数。

6.1 分区综合改正数原理和计算策略

6.1.1 分区综合改正数原理

选取位于中国境内的两个相距 340km 的北斗观测站 sta1 和 sta2, 使用 gbm 精密星历对其进行 BDS 精密单点定位, 计算定位后的相位残差。图 6.1 为 C06 卫星的相位定位残差。由图中可以看到, 两个站虽然相距 340km, 但其相位残差变化趋势高度相关, 这说明除了相位随机噪声外, 这两个站还存在相近的轨道、钟差、对流层或多路径的残余误差。

同样以这两个站为例, 利用北斗广播星历和广域增强信息计算无电离层组合相位观测值的残差, 将这两个站上所有卫星的相位观测值残差进行比较, 见图 6.2。可看到, 两个站对所有卫星的综合改正呈现完全线性相关。

图中的相位观测值残差中存在大小不同的常量平移, 这是由于相位模糊度初值不准确造成的。由相位观测方程可知, 相位观测值残差中, 除了常量的模糊度偏差, 还包含了广域差分信息改正剩余的轨道、钟差和对流层模型残差。如果将

⁹⁷ <http://www.beidou.gov.cn/>

其中一个测站的综合改正信息用于修正另一个测站相应的观测值,由于相位观测残差中的模糊度偏差能被模糊度参数完全吸收,剩余的部分能够大大减小观测值的误差,从而提高用户定位的收敛速度和精度。

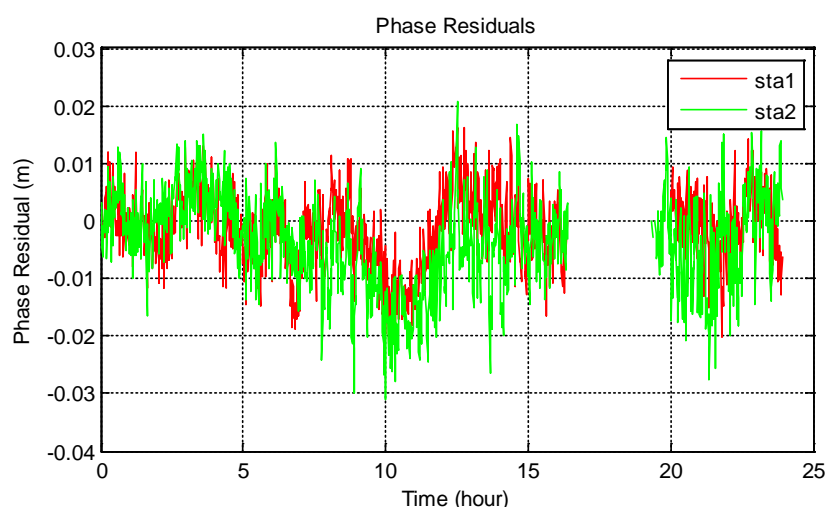


图 6.1 两个站 BDS 精密定位后 C06 的相位残差

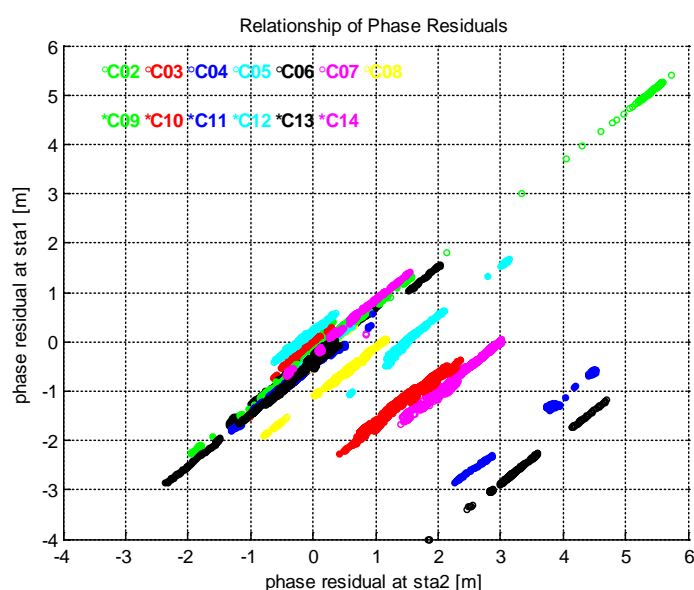


图 6.2 两个站的 BDS 相位观测值残差

基于以上结果可以认为,经过广域增强差分信息修正后的观测值在一定区域内具有相关性,包括含有共同或相近的剩余轨道误差、钟差误差、对流层误差、电离层误差等。

在一定区域范围内,这些误差很难完全分离。因此将这些误差按照区域进行划分,将其综合误差称为分区综合改正数(Zone Correction)。

下面讨论区域范围对分区综合改正数的影响。

在中国境内,当其高度角最高时,其轨道误差对中国东西两端的影响差异最大(钟差误差没有方向性)。

由于中国经度范围为 $73^{\circ} \text{ E} \sim 135^{\circ} \text{ E}$,假定最西边与中心的纬度差异为 30° ,

则图 6.3 中卫星高度角最高时与测站的地心夹角 $\alpha = 30^\circ$ ，根据余弦定理，卫星至接收机的距离为：

$$s = \sqrt{(R+H)^2 + R^2 - 2 \cdot R \cdot (R+H) \cdot \cos\alpha} \quad (6.1)$$

此时卫星最大天底角为：

$$\cos\beta = \frac{(R+H)^2 + s^2 - R^2}{2 \cdot s \cdot (R+H)} \quad (6.2)$$

以轨道高度为较低的 MEO 卫星为例，根据上述公式，可计算得到 $\cos\beta = 0.9904$ ，即卫星最大天底角为 7.94° 。

由第四章可知北斗 MEO 卫星的轨道径向误差精度为 $\delta R = 0.53\text{m}$ ，则东西端的投影系数差异最大为： $0.53\text{m} \cdot (1 - \cos\beta) \cdot 2 = 0.01\text{m}$ ，这样的误差几乎可以忽略。

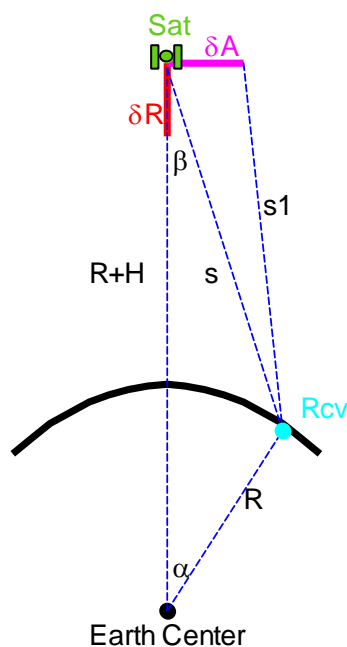


图 6.3 轨道误差对观测值的影响示意图

对于轨道平面误差（主要是切向误差）的影响，由图 6.3 可得：

$$s1 = \sqrt{s^2 + \delta A^2 - 2 \cdot s \cdot \delta A \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \beta)} \quad (6.3)$$

则切向误差对东西两端的观测值误差影响的最大差异为：

$$ds = 2 \cdot (s - s1) \quad (6.4)$$

由第四章可知北斗 MEO 卫星的轨道切向误差精度为 $\delta A = 3.0\text{m}$ ，将其代入上式中，可得 $ds = 0.83\text{m}$ ，这样的误差不可忽略。

假定在某一半径为 500km 的区域，此时 $\alpha = 4.49^\circ$ ，将其代入式(6.1)至式(6.4)，

可计算得此时的 $ds=0.13m$ ，其影响已明显减小。

实际上，目前的北斗广域增强信息中除了等效钟差改正，还包括轨道改正。经轨道改正后的轨道残余误差可进一步减小，这样对于 500km 区域内的 ds 影响可在 10cm 以内，而这仅是卫星处于最大高度角时的最大误差，当卫星高度角降低时， ds 可进一步减小。

6.2.2 分区综合计算策略

基于单参考站的伪距相位综合改正数计算策略

仿照式(2.13)和式(2.24)，对于 B1B2 双频伪距和相位观测值，在参考站 r 上，有：

$$\begin{aligned} P_{IF,r} &= \rho_r + d\rho_r + c \cdot (\delta\delta_0 + dt_r) - c \cdot (\delta\delta^s + dt^s) - \Delta_{rela} + T + dT_r + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \varepsilon_{P_{IF}} \\ L_{IF,r} &= \rho_r + d\rho_r + c \cdot (\delta\delta_0 + dt_r) - c \cdot (\delta\delta^s + dt^s) - \Delta_{rela} + T + dT_r + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \\ &\quad \lambda_{IF} \cdot (N_0 + dN_r) + \frac{c}{f_1 + f_2} W + \varepsilon_{L_{IF}} \end{aligned} \quad (6.5)$$

式中， δ_{ESC} 和 δ_{orb} 分别为北斗广播星历差分信息中的等效钟差和轨道改正数， ρ_r 和 δt^s 为由广播星历计算得到的几何距离和卫星钟差， $d\rho_r$ 和 dt^s 为广播星历经过等效钟差和轨道改正后剩余的误差。 δt_0 为参考站接收机钟差近似值， dt_r 为接收机钟差近似值误差。 T 为根据实测气象数据或者对流层延迟模型计算的对流层延迟， dT_r 为对流层改正残余部分。 N_0 为卫星模糊度近似值， dN_r 为卫星模糊度近似值与真值差异。其余参数与式(2.13)和式(2.24)的定义相同。

定义伪距相位的综合改正数为：

$$\begin{aligned} dP_{IF,r} &= d\rho_r + c \cdot dt_r - c \cdot dt^s + dT_r + \varepsilon_{P_{IF}} \\ dL_{IF,r} &= d\rho_r + c \cdot dt_r - c \cdot dt^s + dT_r + \lambda_{IF} \cdot dN_r + \varepsilon_{L_{IF}} \end{aligned} \quad (6.6)$$

可以看到， $dP_{IF,r}$ 和 $dL_{IF,r}$ 实际上为这些误差的综合。

对于距离参考站较近的用户站 u ，同样可以列立形如式(6.5)的观测方程，将式(6.6)代入用户观测方程中，可得：

$$\begin{aligned} P_{IF,u} &= \rho_u + d\rho_u - d\rho_r + c \cdot (\delta\delta - dt_r) - c \cdot (\delta\delta^s + dt_u^s - dt_r^s) - \Delta_{rela} + \\ &\quad T + dT_u - dT_r + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + dP_{IF,r} + \varepsilon_{P_{IF}} \\ L_{IF,u} &= \rho_u + d\rho_u - d\rho_r + c \cdot (\delta\delta - dt_r) - c \cdot (\delta\delta^s + dt_u^s - dt_r^s) - \Delta_{rela} + \\ &\quad T + dT_u - dT_r + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \lambda_{IF} \cdot (N + dN_r) + \frac{c}{f_1 + f_2} W + dL_{IF,r} + \varepsilon_{L_{IF}} \end{aligned} \quad (6.7)$$

假定在很短时间差异内，卫星钟差误差、轨道误差和对流层残余部分变化很小，若用户站和参考站在一定距离范围内，则用户站和参考站的卫星轨道、卫星钟差、对流层延迟的残余误差可以互相抵消。则上式可以改写为：

$$\begin{aligned}
P_{IF,u} &= \rho_u + c \cdot (\delta\delta - dt_r) - c \cdot \delta t^s - \Delta_{rela} + T + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + dP_{IF,r} + \varepsilon_{P_{IF}} \\
L_{IF,u} &= \rho_u + c \cdot (\delta\delta - dt_r) - c \cdot \delta t^s - \Delta_{rela} + T + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \lambda_{IF} \cdot (N + dN_r) \\
&\quad + \frac{c}{f_1 + f_2} W + dL_{IF,r} + \varepsilon_{L_{IF}}
\end{aligned} \tag{6.8}$$

上式中，参考站接收机钟差近似值误差可以被用户接收机钟差吸收，参考站卫星模糊度近似值误差可以被用户站卫星模糊度吸收。因此，使用广播星历、钟差改正、轨道改正和伪距相位综合改正信息就可以对用户进行精密定位。

基于多参考站的分区综合改正数计算策略

然而，参考站有时会出现数据中断、数据延迟、数据质量较差等故障，为保证伪距相位综合改正数的连续性和可靠性，需通过多参考站进行计算。在单参考站基础上，设计以指定点位为中心，按照一定距离划定区域作为一个分区。在该分区内，综合区域内所有参考站观测数据计算每颗卫星的伪距相位综合改正数，即为分区综合改正数。

对于分区内的每一个参考站，都可以计算形如式(6.6)的分区改正数，理想状态下，可通过加权平均计算该分区的综合改正数。

$$\begin{aligned}
\delta P_{zone} &= \frac{\sum_{i=1}^n w_i dP_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \\
\delta L_{zone} &= \frac{\sum_{i=1}^n w_i dL_i}{\sum_{i=1}^n w_i}
\end{aligned} \tag{6.9}$$

上式中， w_i 为第*i*个参考站的权重。

模糊度归算方法

由式(6.6)和(6.9)可知，基于多参考站的分区相位综合改正数中包含各个参考站对同一颗卫星的模糊度近似值残余误差，即：

$$dN = \frac{\sum_{i=1}^n w_i dN_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{6.10}$$

当某一个参考站未观测到某一颗卫星，而其他参考站观测到该卫星，或某个测站该卫星发生周跳重新初始化，都会导致 dN_i 与原来的不一致，若仍按照式(6.10)计算，则会导致 dN 发生跳变。

模糊度的归算是在一个分区内由于相位观测值周跳或者卫星失锁造成综合改正数跳变的情况下，对分区改正中包含的模糊度进行处理，以保证相位综合改正数的连续性。由于对于未发生周跳的测站或卫星，其模糊度初值误差 dN_i 保持

不变，因此采用基于参考历元和前后历元的变化量来计算分区综合改正数，即

$$\delta L_{zone}(t_i) = \delta L_{zone}(t_{i-1}) + \frac{\sum_{i=1}^n w_i (dL_i(t_i) - dL_{i-1}(t_{i-1}))}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (6.10)$$

上式中， $dL_i(t_i) - dL_{i-1}(t_{i-1})$ 为未发生周跳的卫星的前后历元相位改正数的变化。当发生周跳时，可将该卫星排除。若某个参考站存在故障需要从系统中切出，或者新的参考站加入分区综合改正数的计算时，也可按照上式进行模糊度归算。

非共视卫星处理方法

由式(6.6)和(6.9)可知，基于多参考站的分区伪距和相位综合改正数中包含各个参考站接收机钟差近似值误差，即：

$$dt_r = \frac{\sum_{i=1}^n w_i dt_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (6.11)$$

理论上， dt_r 能被用户接收机钟差吸收。但是，当某一颗卫星无法被所有参考站观测到时，如果仍然按照式(6.11)计算，导致参考站上不同卫星的 dt_r 不一致，无法被用户接收机钟差吸收。

由于 dt_i 不像 dN_i 那样在未发生周跳时保持不变，因此无法像模糊度那样通过前后历元的变化进行归算。对于这种情况，为了保证所有卫星具有相同的 dt_r 以被用户站接收机钟差吸收，在不同参考站上观测的卫星不一致时，选择其中卫星数最多或数据质量最好的测站，并按照式(6.10)进行模糊度归算。

这样，分区综合改正数计算流程主要分为以下三步：

- (1) 计算同一分区各个站的伪距相位观测值残差；
- (2) 计算同一分区各个站的伪距相位观测值残差历元间变化；
- (3) 对各个站分区改正数历元间变化进行综合并与参考历元合并。

6.2 分区综合改正数定位模型

用户获得分区改正数后，即可利用广播星历，结合等效钟差和轨道改正进行实时精密定位。分区综合改正数既可用于双频用户定位，也可用于单频用户定位。

6.2.1 双频定位模型

由于分区综合改正数的计算基于无电离层组合，因此既可用于 B1B2 双频用户，也可用于 B1B3 双频用户。

对于 B1B2 或 B1B3 用户，采用无电离层组合消除电离层误差，其定位模型为：

$$P_{IF} = \rho + c \cdot \delta t - c \cdot \delta t^s - \Delta_{rela} + T + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \delta P_{zone} + \varepsilon_{P_{IF}} \quad (6.12)$$

$$L_{IF} = \rho + c \cdot \delta t - c \cdot \delta t^s - \Delta_{rela} + T + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \lambda_{IF} \cdot N + \frac{c}{f_1 + f_2} W + \delta L_{zone} + \varepsilon_{L_{IF}}$$

上式中各项参数与式(6.5)和式(6.9)相同。由上式可以看出，用户的 UDRE 主要表现为观测噪声、因地区差异造成的卫星轨道平面误差及对流层模型误差之差异。

6.2.2 单频定位模型

对于单频用户，电离层误差是影响其定位精度的重要原因。目前北斗广播星历为基本导航用户提供 8 参数电离层模型，为增强导航用户提供 14 参数电离层模型和格网电离层信息(BDS ICD, 2016)。若采用 14 参数电离层模型或格网模型改正电离层延迟，以 B1 频点为例，其定位模型为：

$$P_1 = \rho + c \cdot \delta t - c \cdot \delta t^s - \Delta_{rela} + I_1 + T + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \delta P_{zone} + \varepsilon_{P_1} \quad (6.13)$$

$$L_1 = \rho + c \cdot \delta t - c \cdot \delta t^s - \Delta_{rela} - I_1 + T + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \lambda_1 \cdot N + \frac{c}{f_1} W + \delta L_{zone} + \varepsilon_{L_1}$$

上式中， I_1 为利用 14 参数电离层模型或格网模型计算的 B1 频点上的电离层延迟。需要注意的是， δt^s 为 B1 频点上的卫星钟差，而式(6.12)中的为 B1B2 或 B1B3 组合频点的卫星钟差，二者之间存在 TGD 差异。

但实际上，北斗格网电离层改正的精度仅为 0.5m 左右(Wu X, 2014)，这样的精度会影响相位精密定位的效果。由 2.2.2 节可知，GRAPHIC 组合根据电离层误差对伪距和相位的影响相反的特性消除了电离层误差(Jones A V, 1993; Gao Y, 2002)。因此基于 GRAPHIC 组合，可建立单频伪距相位用户的 GRAPHIC 定位模型。仍以 B1 频点为例，有：

$$P_1 = \rho + c \cdot \delta t - c \cdot \delta t^s - \Delta_{rela} + I_1 + T + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \delta P_{zone} + \varepsilon_{P_1} \quad (6.14)$$

$$\frac{P_1 + L_1}{2} = \rho + c \cdot \delta t - c \cdot \delta t^s - \Delta_{rela} + T + \delta_{ESC} + \delta_{orb} + \lambda_1 \cdot \frac{N}{2} + \frac{c}{f_1} \frac{W}{2} + \delta L_{zone} + \varepsilon_{L_1}$$

下文将对这两种单频定位模型的定位效果进行评估。

6.3 分区综合改正数模型评估

6.3.1 分区设计

广域分米级星基增强系统计划将中国范围划分成 18 个分区，利用全国分布的监测站在每个分区按照上一节介绍的方法计算各分区的相位综合改正数，最后通过 GEO 卫星实时广播给用户。

目前，由于 GEO 卫星星上资源的限制，只能播发相位分区综合改正数，因此对于伪距观测值，只能使用等效钟差和轨道改正数进行修正。因此相对于式(6.13)和式(6.14)，伪距残差中除了观测值噪声，还包含了经等效钟差和轨道改正后的残余轨道钟差误差及对流层模型改正误差。

图 6.4 显示了各个分区所定义的中心，图中紫色、青色、黄色范围为距离分区中心 300km、600km、1000km 时的覆盖范围。从图中可以看出，当距离分区中心 600km 时，可以覆盖 90% 以上的中国国土范围；当距离分区中心 1000km 时，可以辐射到周围邻近国家。

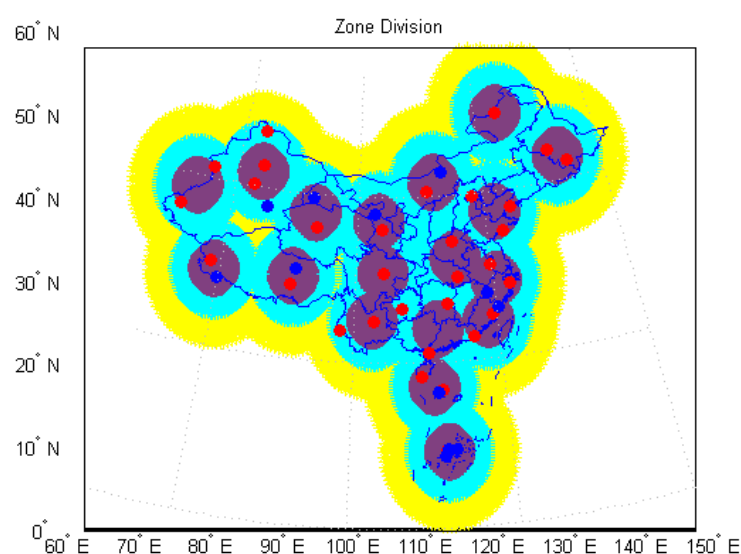


图 6.4 分区覆盖范围及定位测试站

图 6.5 为 2016 年 4 月 8 日某一分区所有卫星的相位分区综合改正数。可看到不同卫星的相位分区综合改正数存在较大差异，这是由于参考站模糊读初值偏差造成的。整体上 GEO 卫星的改正数比较平稳，而 IGSO/MEO 卫星的相位分区改正数则存在随高度角降低而变大的趋势。这表明卫星在高度角较低（出入境前后）的情况下，由于观测条件以及几何构型较差，基本导航电文以及现有星基增强系统中星历、钟差改正存在较大误差，无法精确表达。而分区改正模型正是用于对该剩余误差的修正。

6.3.2 参数播发频度

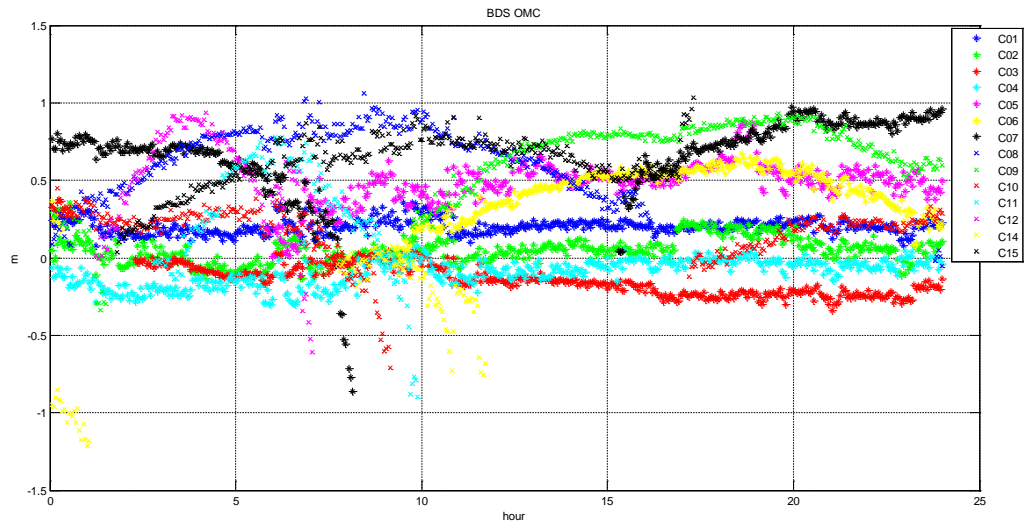


图 6.5 某一分区一天内的分区综合改正数变化

北斗星基增强系统采用的观测数据的采样率为 1Hz，因此分区综合改正数的计算频度最高可为 1 秒。分区综合改正数的播发要求在北斗现有播发协议的基础上，增加每个分区当前观测到卫星的综合改正数。受星上资源限制，根据所需信息量以及接口剩余信息资源，系统支持的分区综合改正数的播发频度最高为 90 秒。考虑到卫星上下行的播发时延，用户使用该参数时需要预报 1.5-3 分钟，因而需要评估不同播发频度下对用户信号精度和定位误差的影响。

分区综合改正数的更新频率设为从 0-6 分钟，也即用户定位中采用的分区综合改正数的预报时间为 0-6 分钟。不同预报时间下广播星历钟差和轨道的径向合成误差的变化见图 6.6（0 分钟下没有误差）。左图和中图从上到下依次为 C01、C06、C11 三种不同类型卫星，左图和中图分别为预报 1 分钟的和 6 分钟的径向合成误差变化，右图为所有卫星在 1~6 分钟预报时间下的径向合成误差变化。

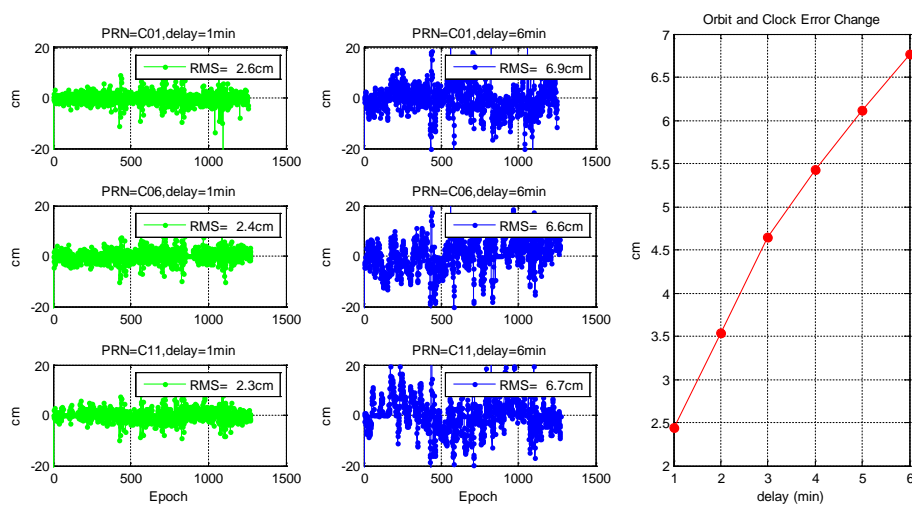


图 6.6 不同预报时间下的广播星历径向合成误差变化

由图可知，预报时间越长，轨道和钟差误差变化越大，基本上时间每增加 1 分钟，预报误差便增加 1cm。因此应尽量控制预报时间的长度。

为评价分区改正数更新频度对用户定位性能的影响，对 2016 年 4 月 8 日共 10 个站的用户数据进行动态定位，统计其 B1B2 双频平面和高程定位误差的 RMS。

计算时，分区综合改正数的更新频率设为从 0-6 分钟，也即用户定位中采用的分区综合改正数的预报时间为 0-6 分钟，结果如图 6.7 所示。从图中可以看到，用户定位精度随播发时延的增加而逐步降低；播发时延小于 2 分钟的情况下，精度变化幅度较小，而大于 2 分钟后，定位精度降低比较明显。播发时延小于 2 分钟的情况下，各站平均平面和高程精度都优于 0.2 米。

为了不影响用户定位精度的损失，又不占用太多星上资源，目前北斗分区改正数按照 I 支路 180s（重点区域可提高采样率），Q 支路 90s 的频度进行播发。

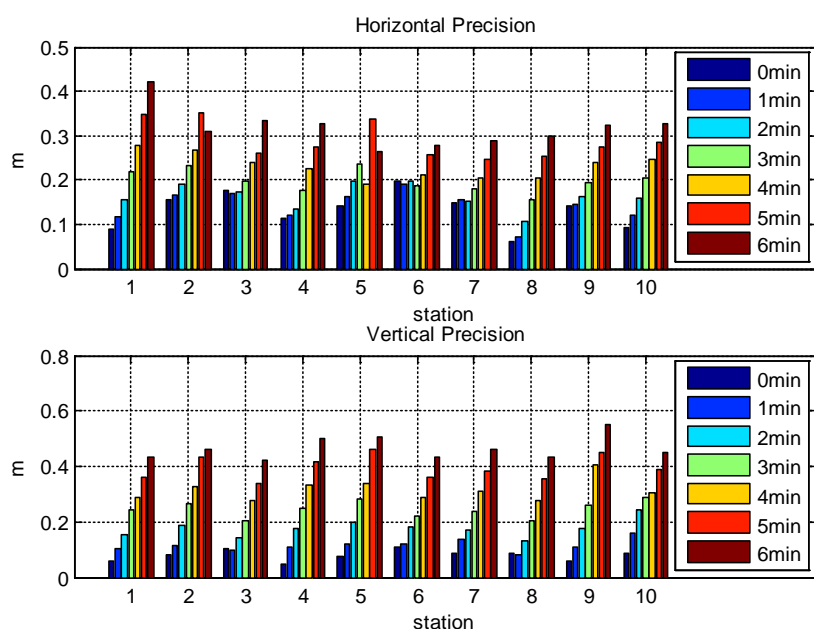


图 6.7 不同播发时延下用户的分区综合改正定位精度变化

6.4 分区综合改正数定位性能分析

为验证分区改正数的精度和可靠性，本节对用户定位结果进行分析。

选取中国范围内的约 30 个北斗观测站，测站分布见图 6.4 中的蓝色和红色点位，其真实坐标的误差在 2cm 以内。分别寻找 1000km 以内的分区，利用该分区的分区改正数进行定位。经过统计，用户至分区中心的平均距离为 597km。为了适应一般用户实际情况，本文只计算 I 支路定位结果。表 6.1 给出了定位时的处理策略和参数估计方法。

为了进行分析，选取 2016 年 DOY346~348 共三天的数据，每 6 个小时截取一段数据，一共计算 12 个时段的结果。对每个时段内的各个用户站寻找 1000km

以内的分区，分别按照 B1B2、B1B3、B1、B2、B3 频点进行用户静态、动态分区改正数定位。

表 6.1 分区改正定位处理策略

估计方法	卡尔曼滤波
卫星轨道和钟差	广播星历
广域差分改正信息	等效钟差，轨道改正，相位分区综合改正
数据采样率	30s
卫星截止高度角	10°
电离层误差	双频：无电离层组合；单频：北斗14参数模型
对流层误差	GPT2w+SAAS+VMF1
固体潮，海潮	IERS协议
测站坐标	估计，静态：常数；动态：白噪声。先验信息10km
测站钟差	估计，白噪声，先验信息1ms
模糊度	估计，先验信息20m

6.4.1 总体定位性能

按照 6.2 中所介绍的方法，对三天所有时段的数据分区改正定位结果进行统计，其中单频采用 GRAPHIC 组合定位模型。将每个时段第 4~6 小时的定位结果作为最终结果，统计其 RMS。表 6.2 为不同频点静态和动态所有测站的分区改正定位统计结果的平均值。

从表中可以看出，对于双频用户，静态定位平均精度在平面小于 0.10m，高程小于 0.15m；动态定位平均精度在平面小于 0.15m，高程小于 0.20m。而对于单频用户，其静态平均定位精度在平面小于 0.16m，高程小于 0.45m；动态平均定位精度在平面小于 0.30m，高程小于 0.46m。单频在静态或动态模式下都比双频用户定位结果差，这主要受伪距电离层改正和 GRAPHIC 组合中伪距观测噪声的影响。由于用户站到分区中心的平均距离为 597km，这个值也可以认为是距离分区中心 600km 内的用户分区改正定位所能达到的精度。

表 6.2 不同频点不同模式下分区改正定位 RMS 统计

频点	静态		动态	
	平面 (m)	高程 (m)	平面 (m)	高程 (m)
B1B2	0.07	0.13	0.11	0.18
B1B3	0.10	0.15	0.14	0.19
B1	0.13	0.36	0.22	0.43
B2	0.14	0.41	0.23	0.43
B3	0.16	0.45	0.27	0.46

为了对照比较，下文都以动态用户定位结果为例进行分析。

为了观察定位误差的分布，图 6.8 统计了 B1B2 组合和 B1 频点分区改正动态定位结果在平面和高程方向的误差分布情况。从图中可以看出，双频用户动态

定位在平面上 87% 优于 0.2m，高程上 83% 优于 0.6m；单频用户动态定位在平面上 81% 优于 0.3m，高程上 88% 优于 0.7m。

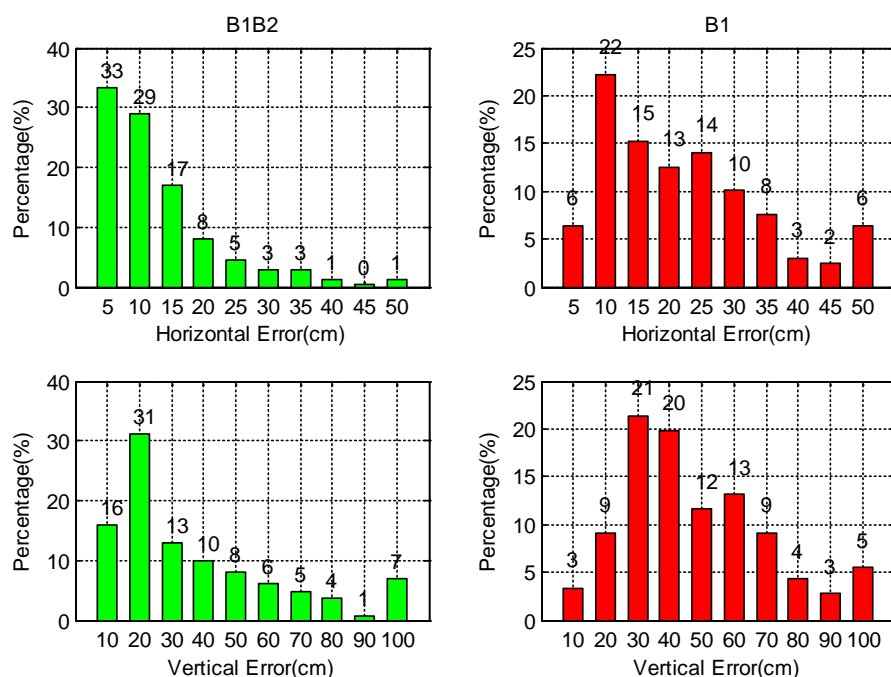


图 6.8 B1B2（左）和 B1（右）分区改正动态定位结果在平面（上）和高程（下）的误差分布

6.4.2 收敛性分析

对于实时动态用户，更关心的是短时间内定位收敛情况，因此本小节对分区改正动态定位收敛情况进行分析。

图 6.9 是一组典型的 B1B2 组合和 B1 频点分区改正动态定位结果，该测站距离分区中心 696km。可以看到，双频数据在半个小时内迅速收敛至 0.5m 以内，单频数据在 1 小时内收敛至 0.5m 以内。统计 1 小时后的定位误差，双频定位精度在 N、E、U 三个方向分别为 0.02m、0.05m、0.19m，而单频定位精度分别为 0.06m、0.11m、0.44m。

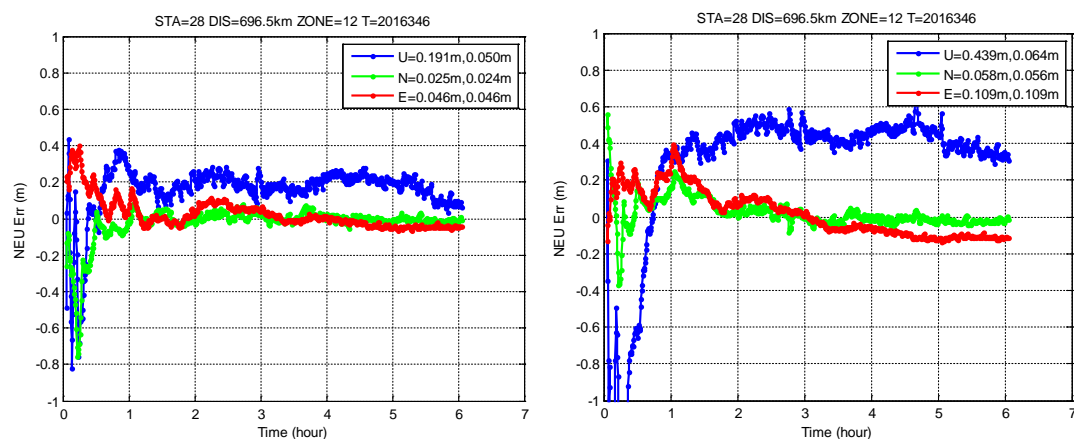


图 6.9 B1B2（左）及 B1（右）典型分区改正动态定位结果

为了观察全部数据的收敛情况,对所有结果 1 小时内的分区动态定位结果进行统计。图 6.10 给出了 B1B2 组合和 B1 频点动态定位收敛情况。对于双频用户,定义 $\text{limerr}=0.5\text{m}$; 对于单频用户,定义 $\text{limerr}=0.8\text{m}$ 。统计三维误差收敛在不同时间内收敛至 limerr 的百分比,并计算平均三维定位误差。从图中可以看出,双频用户在 30min 内三维误差可收敛至 0.5m 以内,单频用户在 30min 内三维误差可收敛至 0.7m 以内。

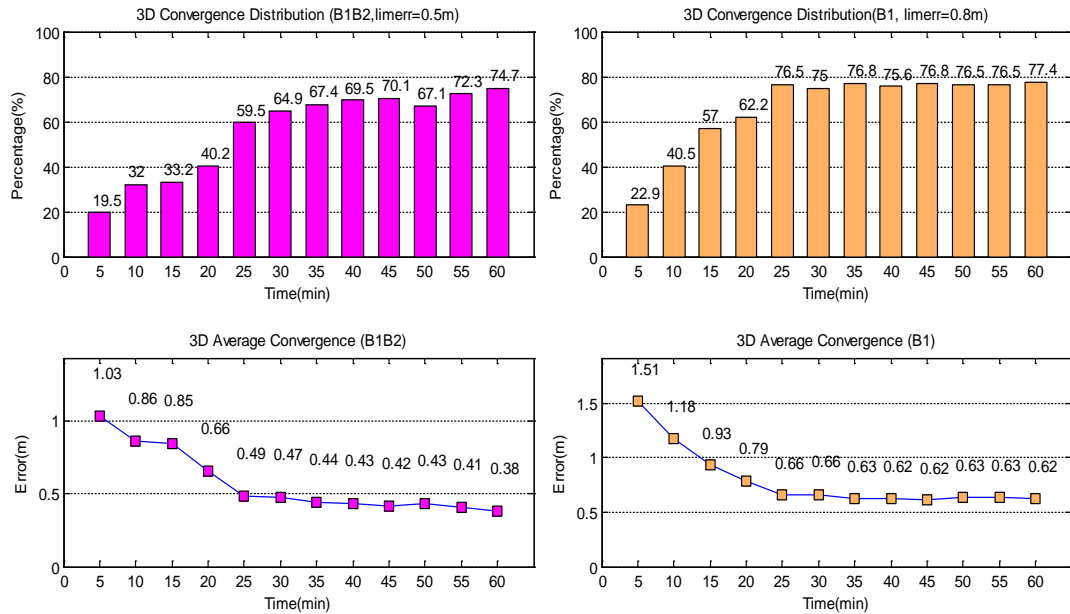


图 6.10 B1B2 (左) 和 B1 (右) 分区改正动态定位收敛情况统计

6.4.3 与 gbu 定位性能比较

GFZ 从 2016 年开始,每隔 3 小时发布一次包含 GPS/GLONASS/GALILEO/BDS/QZSS 在内的超快速精密轨道和钟差产品 gbu(Deng Z, 2016)⁹⁸, 其中包含 24 小时观测部分和 24 小时预报部分。

分别利用分区改正信息和 gbu 精密轨道和钟差进行 B1B2 组合用户动态定位,比较二者的定位效果。由于 gbu 预报部分的钟差精度较差,本文只选用其观测部分的轨道和钟差。图 6.11 给出了二者在动态定位 1 小时后某一个站的三维误差分布情况。从图中可以看出,使用 gbu 产品时,其三维误差 RMS 为 0.34m, 95% 小于 0.52m,而分区改正动态定位三维误差 RMS 为 0.17m,其 95% 小于 0.36m。这说明在服务区范围内,分区改正数较 gbu 超快速星历定位效果更好。这是由于分区改正数不仅改正了轨道和钟差误差,还改正了区域内对流层延迟残差等一些共性误差。

⁹⁸ <ftp://ftp.gfz-potsdam.de/GNSS/products/mgex/>

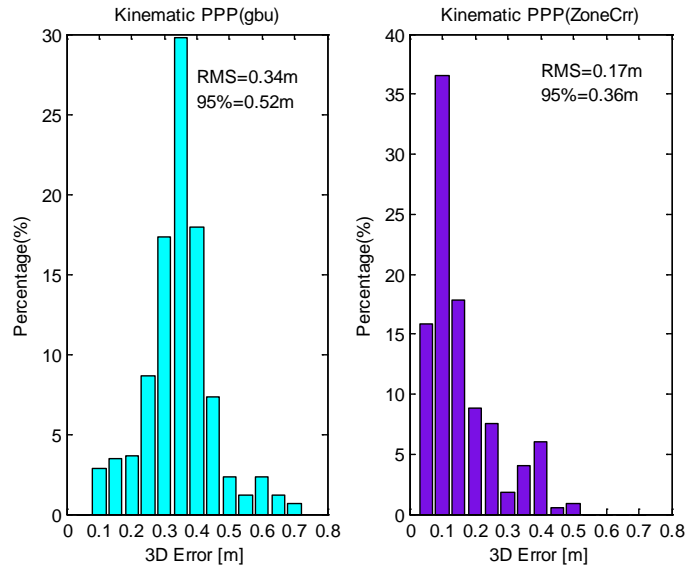


图 6.11 gbu 产品（左） vs 分区改正（右）B1B2 动态定位结果统计

6.4.4 对流层参数影响

由于认为分区综合改正数包含了分区范围内对流层延迟模型的剩余部分，因此前文的结果均为不估计对流层延迟参数。

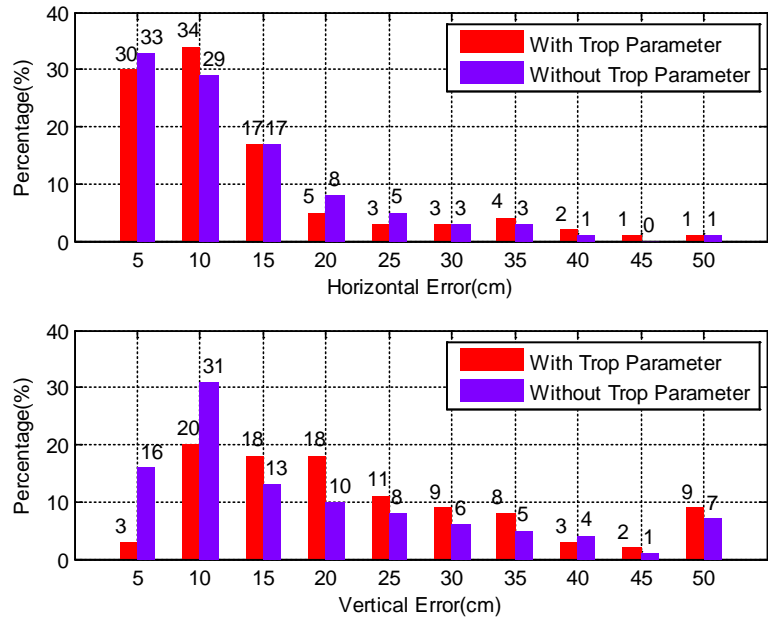


图 6.12 是否估计对流层参数对分区改正 B1B2 动态定位误差的影响

为了对这一假设进行进一步验证，对对流层湿延迟参数进行估计，并与前文中的结果进行比较。估计时对流层参数采用随机游走模型，其方差为 $1\text{cm}/\sqrt{h}$ 。图 6.12 和表 6.3 为 B1B2 组合频点上估计和不估计对流层延迟参数的定位误差在平面和高程上的分布及统计结果。由图中可以看出，不估计对流层延迟参数的定位结果好于估计对流层延迟参数，尤其是在高程方向上。

另外,从表 6.3 中可以看出 2~4 小时和 4~6 小时的定位精度差异很小,这表明 2 小时以后定位结果已经收敛,定位误差趋于稳定。

表 6.3 不同时间下是否估计对流层参数对分区改正 B1B2 动态定位精度影响

时间	估计对流层参数		不估计对流层参数	
	平面(m)	高程(m)	平面(m)	高程(m)
1~2 小时	0.17	0.28	0.17	0.24
2~4 小时	0.12	0.22	0.12	0.19
4~6 小时	0.11	0.22	0.11	0.18

6.4.5 单频定位模型影响

6.2.2 给出了基于传统电离层和 GRAPHIC 模型的用户单频分区改正定位模型,为比较这两种模型的定位差异,分别使用这两种模型进行单频分区改正动态定位,其中传统电离层改正模型采用目前北斗广域增强信息中播发的格网电离层模型。图 6.13 为一组典型的 B1 频点上两种定位模型的定位结果,可以看到采用传统电离层单频定位模型,其定位效果远远不如 GRAPHIC 组合的结果。这是因为电离层模型精度为 0.5m,且其模型误差在短时间内是系统性的;而 GRAPHIC 虽然受伪距噪声影响,但伪距噪声是白噪声,随着历元增加,其均值慢慢减小,从而对相位观测值的影响越来越小。

表 6.4 比较了传统电离层单频定位模型(采用广域增强信息中的等效钟差改正和轨道改正信息,不加分区改正信息)、传统电离层单频分区改正定位模型及 GRAPHIC 组合分区改正定位模型三种方法在平面和高程上的定位结果差异。由表可知,采用传统等效钟差改正和轨道改正信息后,单频用户的定位精度在平面和高程已经能达到 1m 以内;增加分区改正信息后,其定位精度进一步提高;而采用 GRAPHIC 模型后, B1 单频定位精度能达到平面 0.22m,高程 0.43m。

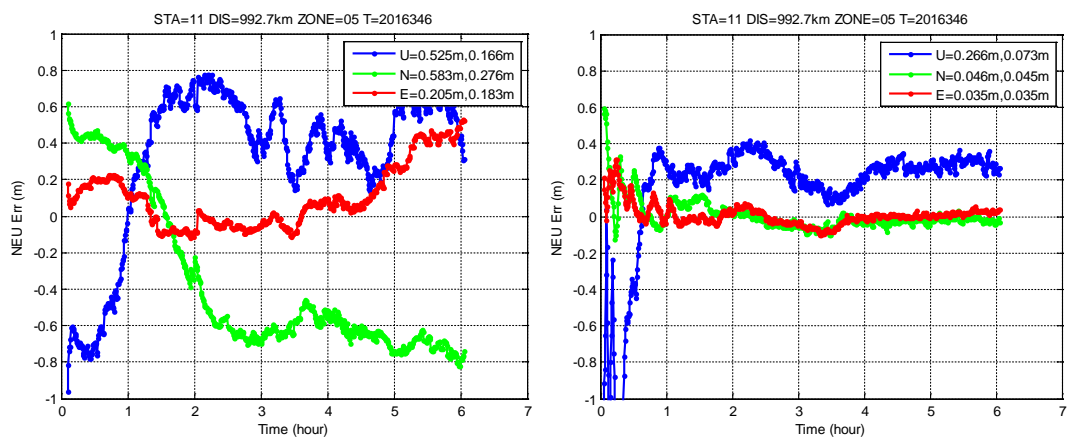


图 6.13 传统单频定位模型(左) GRAPHIC 定位模型(右) B1 动态定位差异

表 6.4 不同单频定位模型对分区改正 B1 动态定位精度的影响

种类	传统定位模型(无分区改正)	传统分区定位模型	GRAPHIC 分区定位模型
平面(m)	0.67	0.42	0.22
高程(m)	0.99	0.87	0.43

6.4.6 分区改正数中国范围内定位效果

前面分析了分区改正定位的效果及优势,本节对所有数据的结果进行进一步统计,图 6.14 给出了年积日为 346 这天不同观测时长(第 1~2h,第 2~4 小时,第 4~6 小时)下观测站至分区中心的距离与 B1B2 组合分区改正动态定位 RMS 的关系。由图中可以看出,2 小时后用户定位实际上已经趋于稳定;随着用户站距离分区中心越远,定位效果总体呈现变差的趋势。由 6.1.1 中的分析可知,随着距离变远,卫星轨道平面误差的差异越大,因而分区改正数的精度也随之下落。

总体上,当用户在分区中心 1000km 范围内时,分区改正数都能实现分米级定位服务。

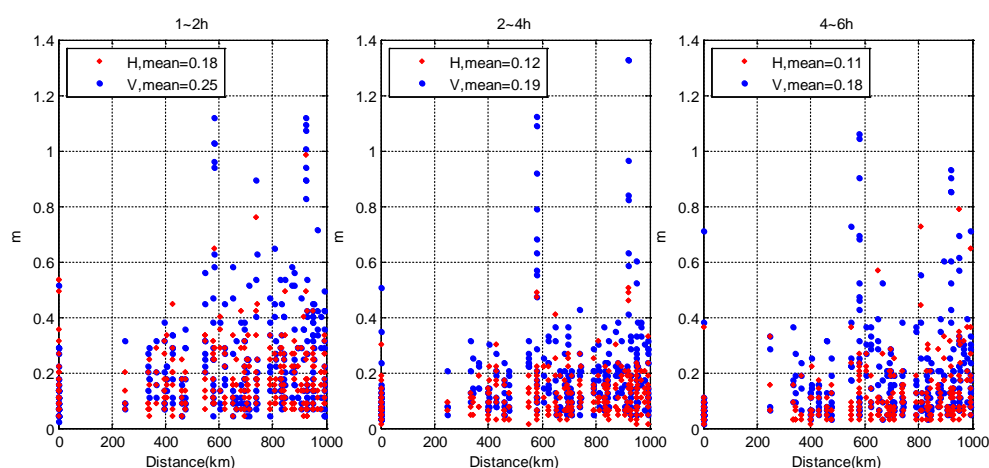


图 6.14 不同时长范围内分区改正定位结果与分区中心距离关系(以 B1B2 动态定位为例)

6.5 BEB 在分区改正定位中的应用

第四章分析了北斗广播星历偏差(BEB),并认为其产生原因可能是北斗监测站接收机与 IGS 监测站接收机对相同卫星的通道时延标定不一致,并通过 MGEX 监测站验证了经 BEB 改正后的广播星历定位精度能得到提升。6.4 节中采用的测站接收机类型与北斗系统采用的监测站为同一类型接收机。由于分区改正定位中使用广播星历,因此对于普通用户接收机或者 IGS/MGEX 监测站,BEB 可能会对分区改正定位结果造成影响。

为验证这一假设。选取 2016 年 DOY345~DOY349 间中国附近能观测到北斗数据的 MGEX 监测站数据进行验证,其中有数据的 4 个 MGEX 监测站为 DAE2(韩国)、NCKU(台南)、JNAV(越南)、DLTV(越南)。另外,还选择位于上海嘉定区的司南导航接收机在相同时间的数据。与前一节处理方法类似,分别寻找 1000km 以内的分区,利用该分区的分区改正数进行定位,每 6 个小时截取一段数据,每天计算 4 个时段的分区改正 B1B2、B1、B2 频点(没有 B3 数据)的定位结果。经统计,这 5 个观测站距离分区中心的平均距离为 640km。

图 6.15 为改正和不改正 BEB 第 1 小时内所有站所有时段 B1B2 和 B1 频点动态定位平均三维误差。由图可知改正 BEB 后 B1B2 频点组合的收敛效果明显

变好, 1 小时后平均三维误差由 1.24m 提高至 0.58m。而单频的改善情况则不太明显。

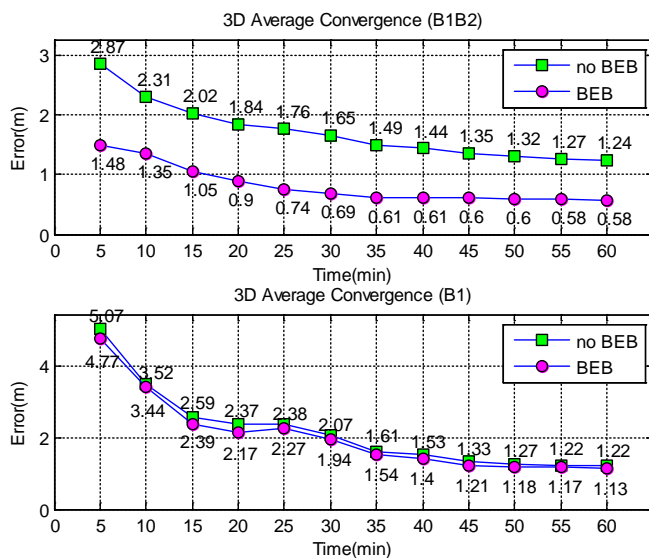


图 6.15 是否改正 BEB 对分区改正 B1B2 和 B1 动态定位收敛情况的影响

图 6.16 是改正 BEB 前后 NCKU 站的 B1B2 组合动态定位误差比较。可以看到, 改正 BEB 后定位收敛时间明显变短了。

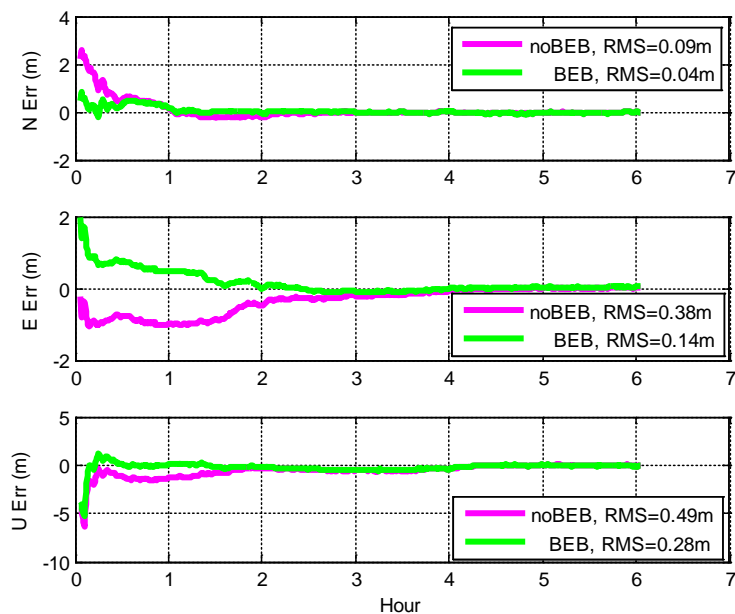


图 6.16 改正 BEB 对分区改正 B1B2 动态定位的影响

表 6.5 给出了改正和不改正 BEB 后所有站所有天的平面和高程在 1~2 小时、2~4 小时和 4~6 小时的平均定位精度。可以看到改正 BEB 后 B1B2 分区改正定位结果在前 4 小时有改善, 4 小时以后则不太明显。这是因为随着时间累积, 模糊度收敛, 伪距在定位中的影响越来越小。而对于单频, 其改善结果则不太明显。

另外, 与 6.4 节结果相比, MGEX 监测站和普通用户接收机的分区改正定位结果有所下降, 这可能是接收机类型不一致和数据质量等方面的原因。

表 6.5 不同时间下是否改正 BEB 对分区改正 B1B2 和 B1 动态定位精度影响

时间(小时)	B1B2				B1			
	不改正 BEB(m)		改正 BEB(m)		不改正 BEB(m)		改正 BEB(m)	
	平面	高程	平面	高程	平面	高程	平面	高程
1~2	0.73	0.75	0.33	0.37	0.75	0.84	0.73	0.79
2~4	0.35	0.55	0.22	0.29	0.47	0.82	0.45	0.77
4~6	0.15	0.25	0.17	0.22	0.34	0.80	0.33	0.76

6.6 本章小结

本章介绍了北斗广域分米级星基增强系统中分区改正数的原理和计算策略,先介绍基于单个参考站的综合改正数模型,在此基础上将其拓展到基于多参考站的分区改正数计算方法,并介绍了实时数据处理中的模糊度归算和非共视卫星的处理方法。进而给出了基于分区改正数的用户单频和双频定位模型。进一步介绍了我国目前广域增强信息中分区改正数的分区设计,并对参数播发频度对分区改正数模型的影响进行了评估。在此基础上,为了验证分区改正数的精度和可靠性,对其定位性能进行全面而系统的评估,以为我国广域分米级星基增强系统的性能和应用提供参考和依据,结果表明:

(1) 分区综合改正数更新频度在 2 分钟以内,用户站定位精度相差不明显;更新时间超过 2 分钟后,定位精度下降明显。

(2) 基于分区改正定位能实现分区中心 600km 范围内双频用户静态定位平面小于 0.10cm,高程小于 0.15m;动态定位精度平面小于 0.15m,高程小于 0.20m。单频用户静态定位精度平面小于 0.16m,高程小于 0.45m;动态定位精度平面小于 0.30m,高程小于 0.46m。动态定位双频用户在 30min 内三维误差可收敛至 0.5m 以内,单频用户在 30min 内三维误差可收敛至 0.7m 以内。

(3) 在服务区范围内,分区改正数较 gbu 超快速星历在定位精度和实时性上都具有明显优势。分区改正数吸收了分区内大部分对流层延迟的模型残差。采用 GRAPHIC 模型能实现 B1 单频用户平面 0.22m,高程 0.43m 的定位精度。

(4) 随着用户站距离分区中心越远,定位效果总体呈现变差的趋势。总体上,当用户在分区中心 1000km 范围内时,分区改正数都能实现分米级定位服务。

(5) 对于 IGS 站或普通用户接收机,北斗广播星历偏差改正能提高分区改正双频定位精度和收敛时间。

以上结果表明分区综合改正模型有效提高了北斗星基增强系统服务性能,能够满足用户基于相位观测值的分米级定位精度的需求。目前,改造的北斗广域增强系统已经上线,用户已经可通过广播电文收到分区改正数。未来,只要用户对接收机软件进行升级改造,就可以在服务区范围内实现分米级精密定位,这将为我国北斗导航系统的推广和应用提供重大支持。

第7章 GPS/BDS 精密卫星钟差加密

由第三章分析可知,卫星钟差采样率对用户精密定位的影响很大。尤其是当观测数据采样率高于卫星钟差时,这是因为采用常规的钟差线性内插会降低卫星钟差精度,只有当卫星钟差采样率达到 5s 以上时,进行线性内插才不影响钟差精度(Bock, 2009)。高频高精度卫星轨道和钟差对于动态精密定位,尤其是低轨卫星定轨中具有重要作用(Zhu S, 2004)。文献表明对采样率为 15 分钟的精密轨道进行内插,其精度损失在毫米级(张守建, 2007),因此对于精密定轨定位,必须获得高采样率的精密卫星钟差。

目前获取高采样率卫星钟差的方法主要有非差和历元间差分两种。普通非差方法计算卫星钟差需耗费大量时间,有些 IGS 分析中心在获得低采样率卫星钟差后,采用固定其他参数的方式获得更高采样率的卫星钟差(韩保民, 2006),但这种方法计算效率仍然较低。基于此,欧洲定轨中心(CODE)提出了一种更有效的卫星钟差加密算法(Bock, 2009; Dach, 2009),这种方法消除了相位模糊度,其计算效率大大提高了。国内一些文献也对这种方法进行了研究和探讨,但仍仅限于 GPS 和 GLONASS(Chen J, 2014; 马卓希, 2016)。

北斗系统自 2012 年正式提供服务以来,已经成为 GNSS 系统的重要组成部分。然而,目前只有德国地学研究中心(GFZ)自 2015 年 5 月起提供 30s 采样率的北斗卫星钟差。其他分析中心如 CODE, 武汉大学(WHU)只提供 5min 采样率的北斗卫星钟差⁹⁹,这必然会限制北斗精密定位的应用,因此有必要研究获取北斗高采样率卫星钟差的方法。

7.1 精密钟差获取方法

高精度卫星轨道和钟差的处理,一般是利用全球分布的 GNSS 监测站数据。目前应用最广泛的高精度 GNSS 轨道和钟差产品由 IGS 提供,其包括了 CODE、GFZ、WHU 等分析中心。随着计算采用的卫星、测站个数的不断增加,定轨时需要估计的参数个数也越来越大。因此 IGS 各分析中心精密轨道和钟差的计算所采用的数据采样率通常为 5~15 分钟。在此基础上获取的卫星钟差的采样率也相应较低为 5~15 分钟,更高采样率的卫星钟差的获取主要有两种方法。

第一种方法在获取低频钟差数据处理的基础上,固定精密轨道、地球自转参数、测站坐标等其他参数,采用精密单点定位的方法估计更高采样率的卫星钟差。这种方法仍然要估计大量的模糊度参数,随着监测站和卫星数目的增加,需要估计的参数仍然较多,因此效率仍然受到影响。

图 7.1 显示了这种方法中参数个数随着测站增多和系统增加的变化。由图中可以看出,随着测站数目增加,待估参数急剧增加,尤其是模糊度参数。因此其计算效率十分缓慢。

⁹⁹ <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex/>

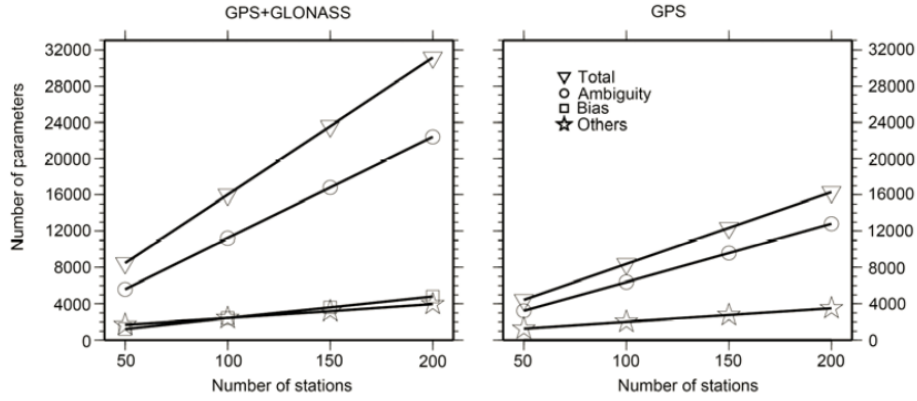


图 7.1 参数个数随测站数变化

第二种方法在获取低频钟差数据处理的基础上,通过相位观测值历元间差分的方式获取卫星钟差在历元间的变化,并通过在低频采样点上增加钟差约束的方式计算绝对钟差。该方法消除了模糊度参数,效率大大提高。利用相位历元间差分的方法进行钟差加密最早由 CODE 提出(Bock, 2009),该方法主要分为三步:

(1) 采用低频数据,进行常规精密轨道和钟差解算,获取低频钟差参数;(2) 估计高频历元间钟差的变化;(3) 高频精密钟差综合。

CODE 提出的钟差加密算法在处理中要求将所有处理历元的数据形成一个整体的法方程,并通过特殊的矩阵算法进行求解,从而增加了数据处理的复杂度。本章以 CODE 提出的精密钟差加密算法为基础,对其进行了进一步的优化,从而获取高采样率 GPS/BDS 精密卫星钟差,并通过钟差比较及用户精密单点定位等方式对其精度进行了评估。

7.2 钟差加密算法

7.2.1 历元间钟差计算

由上一节可知,非差方法需要估计模糊度,而模糊度参数是影响计算效率的主要原因。因此可以采用历元间差分消除模糊度的影响

对于 GPS/BDS 无电离层组合相位观测值,有:

$$\begin{cases} L_k^G(t_i) = \rho_k^G(t_i) + c \cdot \delta_k(t_i) - c \cdot \delta^G(t_i) + \delta_{Trop}^G(t_i) + \lambda_G \cdot N_k^G(t_i) + \varepsilon_k^G(t_i) \\ L_k^C(t_i) = \rho_k^C(t_i) + c \cdot \delta_k(t_i) + c \cdot \delta_{k,ISB}(t_i) - c \cdot \delta^C(t_i) + \delta_{Trop}^C(t_i) + \lambda_C \cdot N_k^C(t_i) + \varepsilon_k^C(t_i) \end{cases} \quad (7.1)$$

上式中, G、C 分别表示 GPS 和 BDS 系统, L_k 为无电离层组合相位观测值, ρ_k 是卫星到接收机的几何距离, δ_k 是接收机钟差, δ^G 、 δ^C 分别为 GPS 和 BDS 卫星钟差, $\delta_{k,ISB}$ 是 GPS 和 BDS 包含硬件延迟差在内的系统时间偏差, δ_{Trop} 为对流层延迟误差, N_k 为相位观测值模糊度, λ 为相位无电离层组合波长, ε_k

为包含固体潮、海潮、PCO、PCV、相位缠绕及观测值噪声在内的其他误差， c 为光速。

若相邻历元 i 和 $i+1$ 之间没有发生周跳，则模糊度和系统时间差可通过历元间差分消除，历元间差分观测值可表示为：

$$\begin{cases} \Delta L_k^G(t_{i+1,i}) = \Delta \rho_k^G(t_{i+1,i}) + c \cdot \Delta \delta_k(t_{i+1,i}) - c \cdot \Delta \delta^G(t_{i+1,i}) + \Delta \delta_{Trop}^G(t_{i+1,i}) + \Delta \varepsilon_k^G(t_{i+1,i}) \\ \Delta L_k^C(t_{i+1,i}) = \Delta \rho_k^C(t_{i+1,i}) + c \cdot \Delta \delta_k(t_{i+1,i}) - c \cdot \Delta \delta^C(t_{i+1,i}) + \Delta \delta_{Trop}^C(t_{i+1,i}) + \Delta \varepsilon_k^C(t_{i+1,i}) \end{cases} \quad (7.2)$$

上式中 Δ 表示历元间差分算子。对于卫星钟差加密，式中的测站坐标、卫星坐标、对流层误差可在常规精密卫星轨道和钟差解算中事先精密求解。因此上式中的几何距离项和对流层项无需作为参数估计，故(7.2)式可重写为：

$$\begin{cases} \Delta L_k^G(t_{i+1,i}) = c \cdot \Delta \delta_k(t_{i+1,i}) - c \cdot \Delta \delta^G(t_{i+1,i}) + \varepsilon_k^G(t_{i+1,i}) \\ \Delta L_k^C(t_{i+1,i}) = c \cdot \Delta \delta_k(t_{i+1,i}) - c \cdot \Delta \delta^C(t_{i+1,i}) + \varepsilon_k^C(t_{i+1,i}) \end{cases} \quad (7.3)$$

式(7.3)中需要估计的参数只有历元间卫星和接收机钟差之差。参数个数的减少将大大减小法方程的大小，并减少数据处理的计算时间。

由于卫星和测站钟差线性相关，式(7.3)组成的法方程矩阵存在秩亏。通常的处理方法为引入基准参考钟。以上处理参考钟的选择一般可选择外接氢原子钟的测站钟差。在计算过程中，若选定的参考钟消失或发生跳变，可切换至另一参考钟。

历元间差分法方程中可获得历元间差分的方差 $\Delta \delta(t_{i+1,i})$ ，可用于后续的高频精密卫星钟差综合中。

7.2.2 高频精密钟差综合

通过上一小节可得到各卫星历元间钟差之差 $\Delta \delta(t_{i+1,i})$ ，为了获得绝对钟差，还需要提供参考历元的绝对钟差。常规精密轨道和钟差解算数据处理中，能够获取采样率为5~15min的低频钟差，其精度最高可以达到0.02~0.06ns¹⁰⁰，因此可作为约束条件。CODE的方法将所有历元的历元间钟差和5min的绝对钟差形成一个整体法方程，并通过特殊的矩阵算法进行求解。但是这样增加了法方程的大小，影响计算效率，因此本文对这种方法进行进一步优化。假定历元间卫星钟差之差的采用率为30s，对于某一颗星，可列立如下式的误差方程：

$$\begin{cases} -\delta(t_1) + \delta(t_2) & = \Delta \delta(t_{2,1}) \\ -\delta(t_2) + \delta(t_3) & = \Delta \delta(t_{3,2}) \\ \dots & \\ -\delta(t_{10}) + \delta(t_{11}) & = \Delta \delta(t_{11,10}) \end{cases} \quad (7.4)$$

引入采样率为5分钟的卫星绝对钟差 δ_{fix} 作为约束条件，有：

¹⁰⁰ <http://acc.igs.org/>

$$\begin{cases} \delta(t_1) & = \delta_{fix}(t_1) \\ \delta(t_{11}) & = \delta_{fix}(t_{11}) \end{cases} \quad (7.5)$$

忽略两历元间钟差之差的相关性，式(7.4)的随机模型可表示为：

$$\varepsilon(t_{i+1,i}) = \frac{\sigma^2(t_{i+1,i})}{\sigma_0^2} \quad (7.6)$$

上式中 $\sigma^2(t_{i+1,i})$ 为历元间差分的方差。综合式(7.4)和式(7.5)，各历元的绝对钟差可通过下式计算：

$$\delta(t_{i+1}) = \delta(t_i) + \Delta\delta(t_{i+1,i}) + \varepsilon(t_{i+1,i}) \cdot d\delta, \quad i = 1, 2, \dots, 10 \quad (7.7)$$

$$\text{其中, } d\delta = \left(\delta_{fix}(t_{11}) - \delta_{fix}(t_1) - \sum_{j=1}^{10} \Delta\delta(t_{j+1,j}) \right) / \sum_{j=1}^{10} \varepsilon(t_{j+1,j})$$

与常规精密轨道和钟差解算采用的数据采样率相同，对于每颗卫星每隔 5~15 分钟可建立以上解算方程。在此基础上得到采样率更高的绝对卫星钟差。

7.3 GPS/BDS 卫星钟差加密实验及评估

基于上一节介绍的方法，开发了卫星钟差加密软件 SHA_HRSCD(High Rate Satellite Clock Densification)。图 7.2 为 SHA_HRSCD 的处理流程。

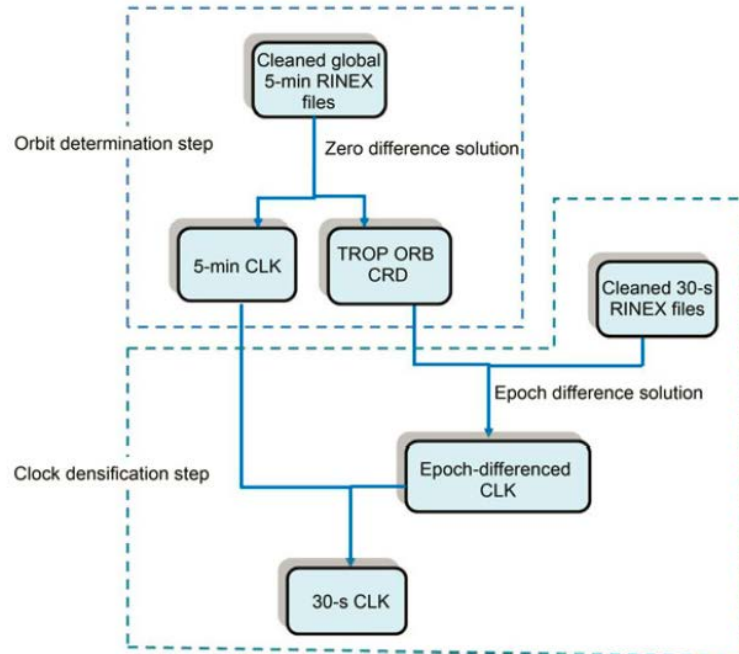


图 7.2 GNSS 钟差加密流程

为了获得 GPS/BDS 的 30s 采样率卫星钟差，采用 2016 年年积日 001~009 的 MGEX 数据，选取共 47 个全球均匀分布的 MGEX 监测站数据（见图 7.3，其中

红色点位 25 个, 蓝色点位 10 个, 黑色点位 12 个), 这些测站大部分都能接收 GPS 及 BDS 数据。目前 IGS 只有 GFZ 分析中心提供采样率为 30 秒的 BDS 卫星钟差, 其钟差加密的方法为 7.1 中介绍的精密单点定位方法。为了进行比较验证, 本文将 GFZ 提供的 30s 采样率的 GPS/BDS 卫星钟差 (gbm_30s) 每隔 5 分钟取一个钟差点, 重新采样成 5min (gbm_5min), 并利用本文介绍的方法将其加密到 30s (sha_30s)。

对于加密后的卫星钟差精度的比较验证, 本节从相对钟差、Allan 方差、移动历元动态 PPP 等方面进行评估。

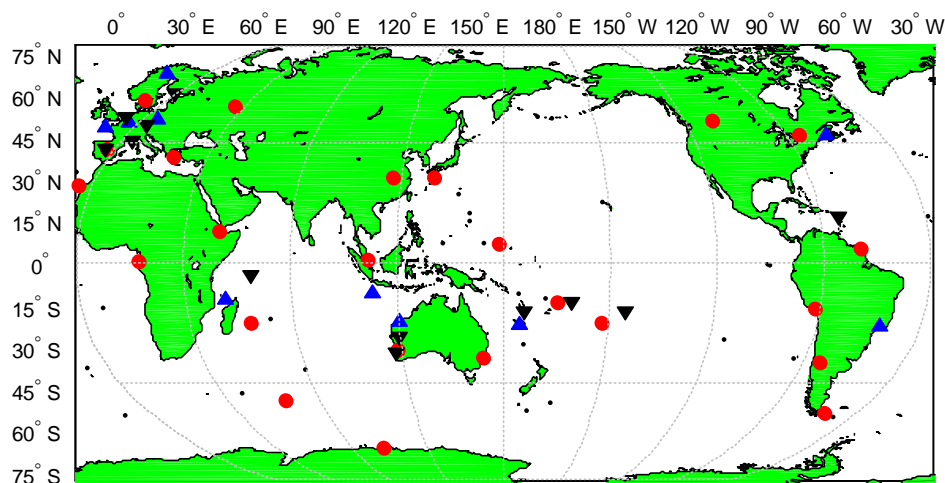


图 7.3 GPS/BDS 钟差加密使用 MGEX 监测站分布

7.3.1 相对钟差精度评估

由于 5min 采样率的卫星钟差来自于 GBM, 可将加密后的钟差 δ_{SHA}^j 与 GBM 提供的 30s 卫星钟差 δ_{GBM}^j 进行比较, 获得二者之间的差异, 其相对钟差误差可定义为:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\delta_{SHA}^j - \delta_{GBM}^j)^2}{n}} \quad (7.8)$$

以 2016 年年积日 001 这一天为例, 图 7.4 给出了 G01 和 C01 卫星 24 小时相对钟差误差的变化情况, 图 7.5 为所有 GPS 和 BDS 卫星相对钟差的 RMS 统计结果。由图 7.4 和图 7.5 可以看出, GPS 的钟差差异为 8.4ps, BDS 的略低于 GPS, 为 9.7ps, 二者对用户观测距离的影响都在 3mm 以内, 远小于 IGS 精密钟差的精度。

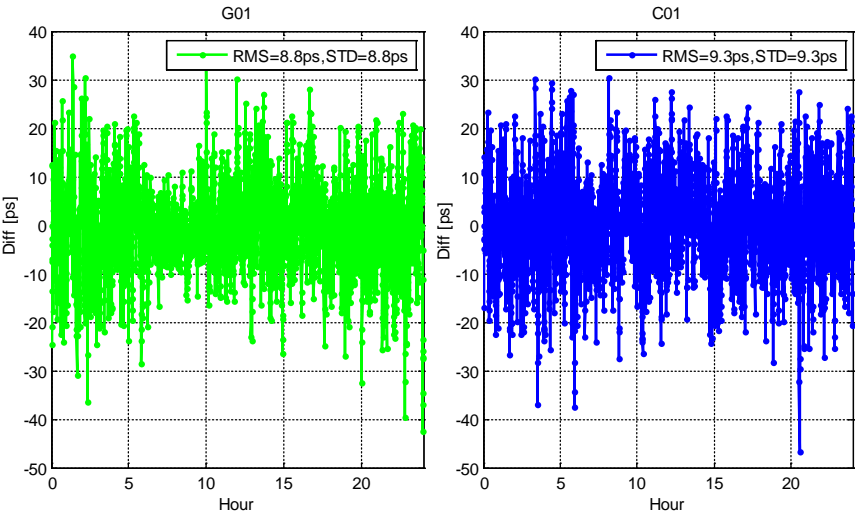


图 7.4 gbm-30s 与 sha-30s 卫星钟差差异；图（左）：G01；图（右）：C01

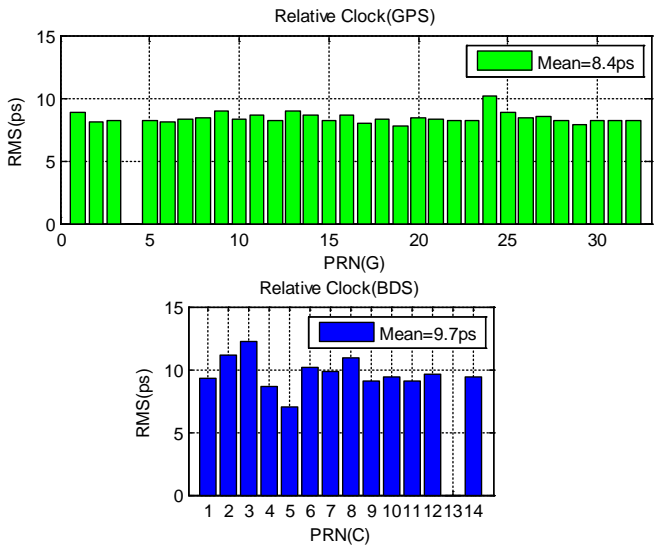


图 7.5 gbm-30s 与 sha-30s 相对钟差 RMS 统计

将 MGEX 监测站分别减少至全球均匀分布的 35 个（图 7.3 红色+蓝色点位）和 25 个（图 7.3 红色点位）站。采用同样的方法对 5min 采样率的 GPS+BDS 卫星钟差进行加密，仍然与 GBM 的 30s 精密卫星钟差进行比较，与由 47 个站计算得到的钟差的比较结果见表 7.1。从表中可以看出，随着监测站个数的减少，加密后的钟差精度略微下降，但仍然在 10ps 左右。这是因为卫星钟差估计与测站几何分布无关，这表明只要观测数据足够，用少量的站就可以估计出高精度的卫星钟差。

表 7.1 监测站数目对钟差加密精度的影响（单位:ps）

测站个数	47	35	25
GPS	8.4	8.8	9.9
BDS	9.7	9.9	10.9

7.3.2 Allan 方差

Allan 方差是检验钟差稳定性的一种评价方式(Allan, 1987; Senior, 2008), 相似的 Allan 方差分布表明钟差具有相近的物理特性, 因此本节用 Allan 评估加密后的 30s 卫星钟差的特性。

图 7.6 给出了 G20 (BLOCK IIR-A)、G31 (BLOCK IIR-M)、G06 (BLOCK IIF)、C04、C08 不同系统及不同类型卫星的钟差从 30s 到 30000s 的 Allan 方差。从图中可以看出加密后的钟差 SHA-30s 与 GBM-30s、GBM-5min 钟差的阿伦方差变化趋势总体上保持一致, 这说明加密的钟差并未改变其噪声类型和稳定性。BLOCK IIF 类型卫星的钟差长稳和短稳特性表现最好, 北斗卫星短稳性能优于 BLOCK IIR-A 和 BLOCK IIR-M 类型卫星, 长稳性能则变差, 这与其他文献中的研究结果一致(Montenbruck, 2017)。

将长稳状态下的 G25 和 G31 卫星钟差 Allan 方差图放大至 5000s~30000s(见图 7.7)。整体上三种 30s 采样率钟差的长稳差异较小。SHA-30s 钟差与 GBM-5min 钟差的 Allan 方差变化趋势和噪声都较为平滑, 而 GBM-30s 钟差较 5min 钟差的 Allan 方差抖动剧烈, 这是由于 GBM-30s 的 PPP 钟差计算方法中噪声所致。

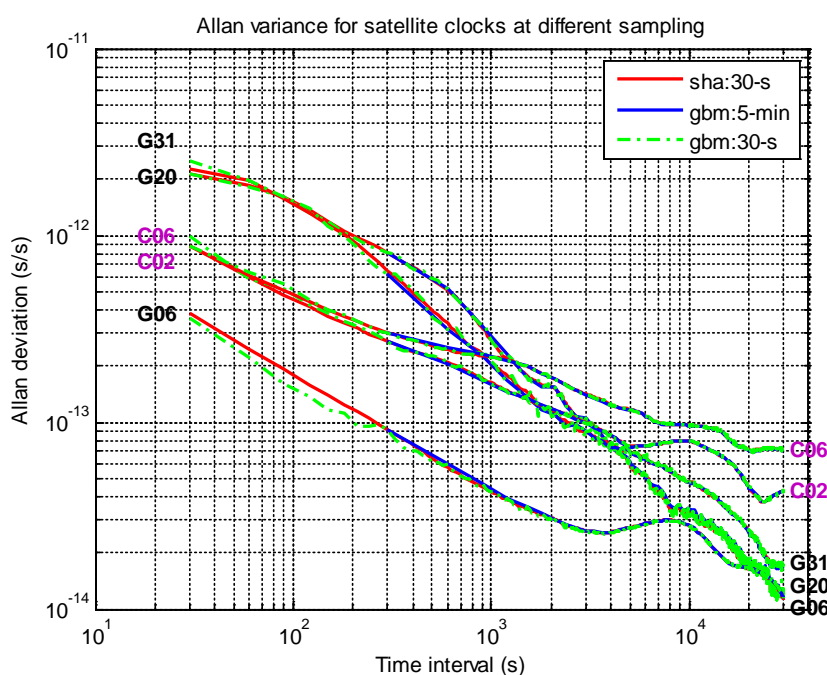


图 7.6 不同卫星的 Allan 方差

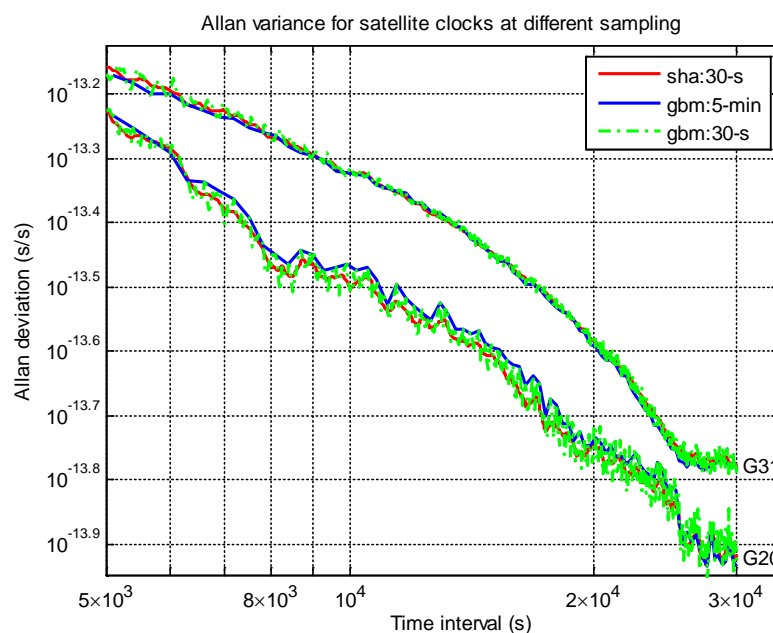


图 7.7 G20 和 G31 的 Allan 方差长稳比较

7.3.3 移动历元动态 PPP

为进一步验证加密得到的卫星钟差的一致性，采用移动历元单天动态 PPP 的方法进行验证。具体做法为：GPS+BDS 单天动态定位中设定 PPP 定位的数据采样率为 5 分钟，第一次处理数据的数据采样时刻为整 5 分钟（即：0，5 分钟，10 分钟.....）；之后每一次处理的数据采样时刻依次后推 30 秒（第二次即为：30 秒，5 分 30 秒，10 分 30 秒.....；第三次即为：1 分钟，6 分钟，11 分钟.....；..... 30 秒，5 分 30 秒，10 分 30 秒.....；.....；第十次即为：4 分 30 秒，9 分 30 秒，14 分 30 秒.....）。以上处理中，第一次采用的钟差为精密定轨获取的 5 分钟采样率的精密钟差，之后每次处理采用的卫星钟差为加密后的对应五分钟采样率的钟差点。通过以上设置计算得到十种动态 PPP 的结果。将单天动态 PPP 一小时后的定位结果与 IGS 给出的精密坐标相比，统计其差值的 RMS。

图 7.8 给出了 6 个 MGEX 监测站 GPS+BDS 的十种动态定位结果，表 7.2 统计了每个站所有结果在 N、E、U 方向的平均标准差，最大标准差，平均峰峰差及最大峰峰差。结合图 7.8 和表 7.2 可以看到，移动历元动态 PPP 差异在毫米级范围，与相对钟差的量级保持一致，这表明加密后的卫星钟差与精密定轨获取的精密钟差精度一致。

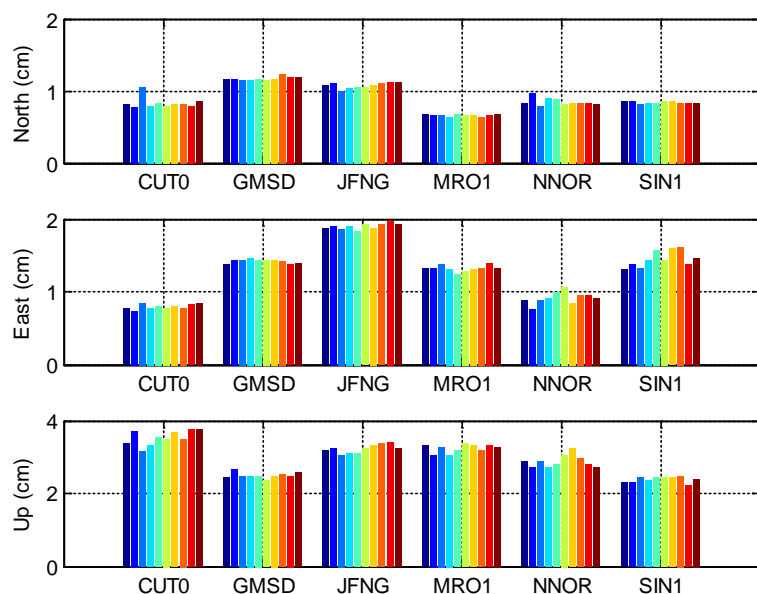


图 7.8 十种 GPS+BDS 动态 PPP 结果比较

表 7.2 GPS+BDS 动态 PPP 差异统计

方向	平均标准差(cm)	最大标准差(cm)	平均峰峰差(cm)	最大峰峰差(cm)
N	0.04	0.08	0.13	0.30
E	0.06	0.11	0.19	0.31
U	0.13	0.21	0.40	0.61

7.4 精密钟差应用

为验证加密后卫星钟差对用户精密定位的提升,将原始 5min 和加密后的 30s 采样率的卫星钟差应用于 GPS/BDS 静态和动态 PPP 中。定位采用 2016 年年积日 001-009 共 9 个 MGEX 站的数据,数据处理基于 Net_PPP 软件,其中采用的解算策略见表 3.1。

首先对定位收敛性进行分析。统计第一个小时内每隔 5min 所有站 GPS+BDS PPP 的平均三维误差,见图 7.9。由图中可知,相对于 5min 采样率,30s 采样率的卫星钟差无论对静态或者动态定位都能提高其收敛时间。对于静态 PPP,采用 30s 的卫星钟差的 PPP 三维误差能在 30min 内收敛至 0.1m,而采用 5min 的卫星钟差只能收敛至 0.2m。对于动态定位,采用 30s 的卫星钟差收敛至 0.2 米需要 15 分钟,而采用 5min 的卫星钟差则需要 40min。这与第三章的研究结论类似。

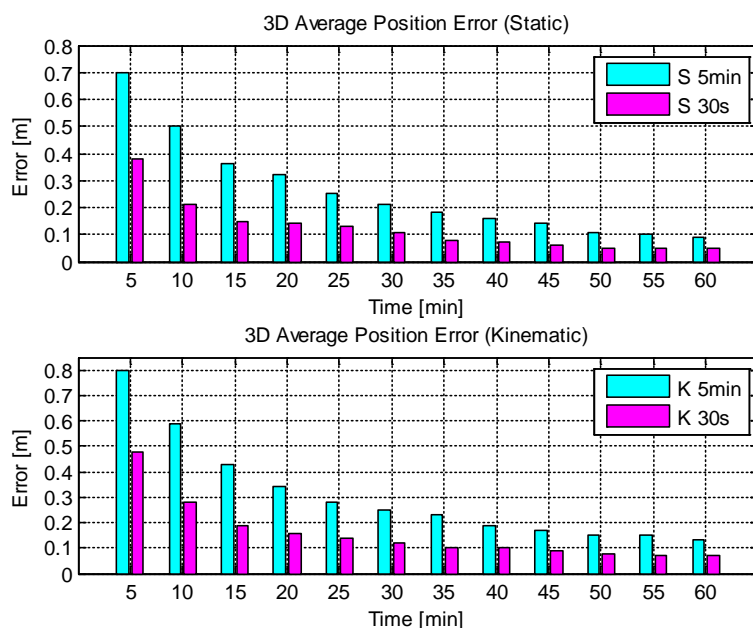


图 7.9 5min 和 30s 采样率下的 GPS+BDS 静态 (S) 和动态 (K) PPP 三维平均收敛误差

为比较不同系统的定位情况,采用加密前后的 GPS+BDS 卫星钟差,分别对 GPS、BDS、GPS+BDS 三种系统组合模式进行定位。对于静态 PPP,不同采样率的卫星钟差对 24 小时最终定位结果几乎没有区别。图 7.10 为两种采样率的卫星钟差在不同系统组合模式下的动态 PPP 统计结果,由于收敛时间内的定位误差较大,因此只统计收敛后(一小时)的定位结果。表 7.3 是所有站的不同模式和卫星钟差采样率下的动态 PPP 统计结果。图 7.11 则给出了其中一个站一天的 GPS+BDS 动态定位变化情况。由图表可以发现,30s 采样率的卫星钟差能明显提高动态定位精度,其中 GPS 提高程度最大, GPS+BDS 次之, BDS 最小。图 7.11 表明其提高原因主要体现在定位结果的噪声明显减小了。同时也可以发现双系统组合动态定位精度较单系统有明显改善。

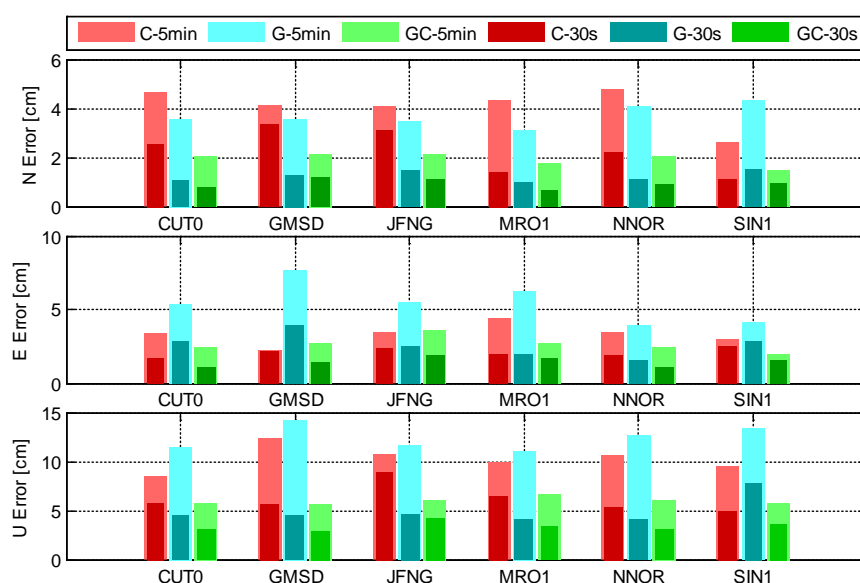


图 7.10 各站动态 PPP 比较

表 7.3 动态 PPP 统计

系统	5min clk			30s clk		
	N(cm)	E(cm)	U(cm)	N(cm)	E(cm)	U(cm)
GPS	3.7	5.5	12.4	1.2	2.6	4.9
BDS	4.1	3.3	10.3	2.5	2.2	8.4
GPS+BDS	1.9	2.6	6.0	1.0	1.5	3.5

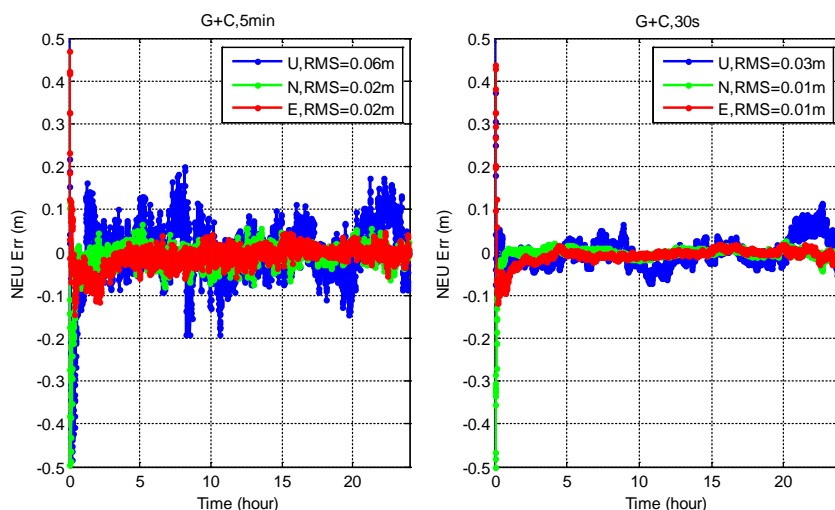


图 7.11 CUT0 站 5min 和 30s 卫星钟差采样率下的 GPS+BDS 动态定位结果

7.5 本章小结

本章介绍了基于历元间差分的精密卫星钟差加密方法，并利用这种算法将 GPS+BDS 卫星钟差从 5min 加密到 30s。结果表明这种加密算法可获取高采样率高精度的卫星钟差，加密后的卫星钟差精度在 10ps 以内，且适当减少观测站个数对加密钟差的精度影响很小。其 Allan 方差与原始 5min 的卫星钟差保持一致，不同历元的钟差对用户动态定位的影响在毫米级。采用加密后的卫星钟差，较原始钟差可以提高 PPP 的收敛时间和动态 PPP 的定位精度。

该算法计算简单，占用计算机内存少，计算效率高。随着 MGEX 监测站数量的增加，采用传统非差方式估计高采样率卫星钟差将越来越耗时，本章的研究结果也表明监测站的数量对钟差加密精度的影响很小，因此，可以利用这种方法高效地获取多系统、高采样率的精密卫星钟差。

第 8 章 结论与展望

8.1 结论

随着各大 GNSS 系统空间信号精度的提升和卫星星座的完善,如何为用户提供更高精度的导航定位服务已经成为其发展趋势。本文在 GNSS 精密定位理论的基础上,全面介绍了目前发展的 GPS/GLONASS/Galileo/BDS/QZSS/IRNSS 各大 GNSS 系统的最新发展状况和增强服务及实时精密定位的应用现状;基于 Net_PPP 分析了目前 GNSS 精密定位性能及影响其收敛情况的因素;分析了各 GNSS 系统广播星历的空间信号精度,并对北斗广播星历偏差进行了研究;分析了影响北斗广域增强系统中的等效钟差的因素;提出了充分利用高精度相位观测信息的分区改正数的概念,并对其定位效果进行了分析;最后采用一种高效的钟差加密方法对 GPS/BDS 高频钟差进行了估计。具体研究成果及结论如下:

(1) 对 GNSS 精密定位基础理论进行了分析和验证。

- GNSS 精密定位中各误差的影响需仔细处理。如 BDS 和 QZSS 中存在卫星零偏模式,在使用不同分析中心的产品时应选择对应的处理模式;距离相对论改正不同卫星间最大差异在 5mm 以内,对于毫米级别精密定位不可忽略。
- 对于双频相位平滑伪距, CNMC 和 Hatch 滤波平滑效果相同;对于单频相位平滑伪距, Divergence-Free Smoother 方法在平滑窗口时间较小时,能取得与 CNMC 相当的效果,若平滑窗口时间过长,可能会出现滤波发散。

(2) 对 GNSS 精密单点定位性能进行了评估,分析了影响精密定位收敛时间和收敛后精密定位精度的因素

- Net_PPP 能取得 GPS 静态 PPP 定位精度在 N、E、U 三个方向上 3.9mm、4.0mm、9.3mm 的定位精度, 93% 的平面误差在 1cm 以内, 97% 的高程误差在 2cm 以内。动态 PPP 精度则可达 1.6cm、2.5cm、5.5cm, 94% 的平面误差在 6cm 以内, 96% 的高程误差在 10cm 以内。这与目前国际上传统 PPP 的定位精度相当。另外,相同条件下,采用不同分析中心产品的静态定位结果差别在 1mm 以内,动态定位结果差异则在 5mm 以内。
- 正常情况下, GPS 静态 PPP 在半小时内三维误差能收敛至 0.1m, 动态 PPP 则半小时收敛至 0.2m, 1 小时后收敛至 0.1m。但同时, PPP 收敛时间受钟差采样率、数据采样率、DOP 变化及参数相关性、伪距噪声及接收机类型、对流层先验信息约束、多系统组合等因素的影响。其中 DOP 值的变化使参数间的相关系数变小,参数间的相关系数与定位误差之间呈现线性关系;不同类型接收机的伪距噪声不同,该差异影响前 10 分钟的定位收敛状况;当观测数据采样低于 5s 时,卫星钟差采样率应尽量不低于观测数据采样率;合适的对流层先验信息能在一定程度上提高初始定位精度;多系统组合定位增加了可用卫星个数,提高卫星 DOP 值,对卫星定位收敛时间有较大帮助。另外,多系统组合定位和高频卫星钟差采样率同样能提高 PPP 收敛后的定位精度。

(3) 分析了 GPS/GLONASS/Galileo/BDS 广播星历的误差及空间信号精度, 对北斗广播星历的系统性偏差进行了分析, 并研究了其对用户定位的影响。

- 近两三年的数据分析结果表明, 目前 GPS 和 Galileo 广播星历空间信号精度可达到 0.6m 和 0.5m 以内。GLONASS 广播星历钟差精度最差, 为 2.13m, 这主要是受其钟差性能较差所致。BDS 广播星历精度则介于二者之间, 其中 GEO 卫星轨道误差最大, IGSO 和 MEO 误差相当, 各卫星切向误差最大, 钟差误差大于径向误差。GEO、IGSO、MEO 卫星广播星历空间信号精度统计结果分别约 2.05m、1.14m、1.53m。
- GLONASS、Galileo 中的 E24 和 BDS 各卫星的 R-Clk 均值除了噪声, 还存在大小各异的系统性偏差。对北斗广播星历偏差的分析结果表明, 该偏差变化较为平稳, 与广播星历 TGD 和 IGS 发布的 DCB 差异之间的相关性很大, 且相同卫星在不同频点的偏差不一致, 推测可能是由于北斗系统监测站使用的接收机与普通接收机相对于不同卫星的通道时延标定不一致造成的。将广播星历偏差改正到用户基本导航定位后, 其定位精度在 N、E、U 三个方向分别提高 14.9%、28.4%、15.5%, 伪距定位残差 RMS 也有改善。

(4) 为提高北斗广播星历空间信号精度, 对北斗广域增强系统中的等效钟差进行了估计, 并对影响等效钟差的相关因素进行了分析。

- 北斗广域差分信息中的等效钟差改正了卫星钟差预报误差和区域网定轨中未能与钟差完全分离的轨道误差, 经等效钟差改正后的用户距离误差由 0.91m 降至 0.26m, 平均定位误差也可由 3.11m 提高至 1.22m。在区域监测网范围内, 只要测站选择合理, 增加测站数目并不会提高等效钟差精度; 等效钟差与卫星频率无关, 但不同频率上的 TGD/DCB 精度会导致等效钟差存在系统性偏差; 在区域监测网范围内, 轨道误差会被等效钟差吸收, 对用户定位的影响不大; 等效钟差可用于用户精密定位中, 只要权重选择合理, 精密定位精度较伪距定位精度可达亚米级。

(5) 为了满足更高精度用户定位的需求, 提出了基于相位观测值的分区综合改正数的概念, 并利用实测数据进行了评估, 同时分析了影响分区改正定位精度的因素。

- 分区综合改正数的分析结果表明, 当分区综合改正数更新频度在 2 分钟以内时, 用户站定位的精度受更新时延的影响较小。初步测试结果表明目前基于分区改正数定位能实现分区中心 600km 范围内双频用户静态定位平面小于 0.10cm, 高程小于 0.15m; 动态定位精度平面小于 0.15m, 高程小于 0.20m。单频用户静态定位精度平面小于 0.16m, 高程小于 0.45m; 动态定位精度平面小于 0.30m, 高程小于 0.46m。动态定位双频用户在 30min 内三维误差可收敛至 0.5m 以内, 单频用户在 30min 内三维误差可收敛至 0.7m 以内。
- 分区综合改正数在在服务区范围内用户精密定位效果优于 gbu 超快速星历的观测部分。分区改正数吸收了分区内大部分对流层延迟的模型残差。采用 GRAPHIC 模型优于传统单频电离层改正模型。随着用户站距离分区中心越远, 定位效果总体呈现变差的趋势。总体上, 当用户在分区中心 1000km 范围内时, 分区改正数都能实现分米级定位服务。

(6) 为了提供高精度高采样率的卫星钟差, 介绍了一种高频卫星钟差加密方法, 并通过实测数据对高频 GPS/BDS 卫星钟差进行了估计, 同时对加密后

的钟差进行了评估。

- 基于历元间差分的精密卫星钟差加密方法可高效地获得高采样率高精度的卫星钟差。测试结果表明加密后的 GPS 和 BDS 卫星钟差精度在 10ps 以内，适当减少观测站个数对加密钟差的精度影响很小，Allan 方差与原始 5min 的卫星钟差保持一致，不同历元的钟差对用户动态定位的影响在毫米级。采用加密后的卫星钟差，较原始钟差可以提高 PPP 的收敛时间和动态 PPP 定位精度。

8.2 进一步工作的方向

本文的研究虽然取得了初步的成果，但仍有许多有待进一步深入进行的研究工作：

（1）受文章篇幅和作者时间所限，本文只对北斗广播星历偏差进行了分析，但从文中结果可以看出 GLONASS 和 Gailileo 部分卫星均存在广播星历偏差的问题，因此下一步有必要对其偏差进行分析，并分析该偏差产生的原因是否与北斗相同。

（2）广播星历偏差计算中基于伪距定位残差的方法虽然简单易于实现，但该方法中对伪距观测值残差取均值以扣除接收机钟差的设定在某些时候并不合理，因为每个监测站同一时刻观测到的卫星并不相同，这样扣除均值时每个测站的广播星历偏差的均值可能并不一样，导致不同测站计算得到的广播星历偏差并不一致。通过类似于等效钟差计算的网解方法则不受每个测站均值不准确的影响，因此在下一步工作中需尝试采用该方法计算北斗广播星历偏差。

（3）目前北斗广域增强系统中等效钟差的计算仍以伪距为主，为提高其精度，并能被相位观测用户所利用，应像 RTX 等系统一样利用伪距和相位观测数据计算轨道和钟差改正数。目前作者的初步分析结果表明对于区域监测网，利用相位观测信息并不能提高等效钟差精度，但结论仍有待进一步深入分析。

（4）非卫星机动条件下，目前的北斗广播星历轨道精度对等效钟差的精度并无太大影响。但对于分区改正数，由于不受区域网网解时轨道和钟差参数间相互吸收的影响，轨道精度的影响不可忽略。因此提高轨道精度，对分区改正数精度及其服务范围都十分重要。另外，受北斗 GEO 卫星星上资源所限，目前只能播发相位分区综合改正数，如果解决分区改正数残留的模糊度问题，为伪距所利用，是后面系统仍需改进的地方。

致谢

樱花落尽，辞春立夏，同济大学迎来了她的百十华诞。从百年校庆本科入学，到百十华诞博士毕业，我在这里不知不觉中度过了人生中最重要十年。回首从硕士入学到这篇博士论文完成的六年，我从一个初涉科研的新人一步步成长，这中间需要感谢的人太多。

首先感谢我的导师吴斌研究员。从硕士转入博士，在王老师的推荐下有幸成为吴老师的学生。吴老师指导下的上海天文台北斗信息处理系统研究团队为我提供了一个优越的研究平台，让我有机会参与北斗系统相关项目的研究。虽然吴老师对我的实际指导不多，但平时对我学习上的建议和宽容，让我时刻不忘督促自己。

其次感谢我硕士阶段的导师王解先教授。正是七年前的“一念之差”我成为了王派子弟的一员，又因机缘巧合使我有机会进入上海天文台进行联合培养。王老师在学术上的谦虚态度和日常中的低调作风深深影响了包括我在内的所有同门弟子。感谢王老师与我分享自己的经历和对我职业生涯规划的建议，同时也感谢王老师多次让我出国参加学术会议和交流。王老师的学术态度和为人处世方式永远都是我学习的榜样。

感谢我的副导师陈俊平研究员。陈老师是我学术和科研上的启蒙老师，无论时在我初涉研究阶段耐心的一步步与我推公式，还是对我论文的细心修改，以及对我生活上的关心，都是我时刻铭记的。谢谢陈老师领导的课题组，让我有机会了解和参与北斗系统相关项目，以及这几年间的各地出差和国内会议，让我在科研的同时拓宽了人生阅历和生活经验。

感谢测绘学院伍吉仓、胡丛玮、沈云中、程效军、陈义等老师在课堂上的传业授道。

感谢北京卫星导航中心的周建华总师、唐波主任，你们对项目的指导和建议让分米级系统更加完善。感谢卫星导航定位总站的赵鹤主任、朱伟刚、刘潇、王兵浩、常志巧、吴杉等人，谢谢每天与我们的共同值班和项目测试。感谢神舟天鸿公司的陈建兵、苗新潮等人，项目和研究得以开展离不开你们的合作。感谢司南卫星导航的刘若普对我能力的认可和司南导航对项目的配合和支持。

感谢我硕士阶段的“1912”交流群成员吴国超、余伟、马绪瀛、谢益炳、陈秋杰、鲍文月、何丽玲，每周一次的聚会让我们度过了最安逸的三年。感谢“bigger”群的李茂、郑二龙、毕元、宫能宝、赵婧文、郭林英，特别是李茂对我的理解和支持，二龙对我的关心和督促，都是我前进的动力。感谢高端科创组的祁欣欣、丁建洋，与你们的交流让我扩展了视野。感谢我同窗十年的好朋友叶真，是你让我走入了电影世界的大门，与你每次的交流和谈心也让我知道了许多学术和生活中的奇闻异事。

感谢陈老师课题组的巩秀强、裴霄、杨赛男、章洁君、王君刚、陈倩、王彬、陈猛、张泽峰、王恒、胡一帆、房成贺等人，与你们在一起，让平时的科研和出差轻松了许多。感谢上海天文台的周善石、曹月玲、赵群河、唐成盼、李冉、郭南男、谭伟杰等人，与你们的交流和讨论让我对北斗系统有了更加深刻的认识。

感谢王老师门下的李浩军老师、邹俊平、黄善琪、韩玲、连丽珍、段兵兵、

王明华、王龙浩、辛杰、杨飞、严宇、王阿昊、侯阳飞、孟令东、鲍金等人，与你们同门是我的幸运。

感谢在 410 教研室一起学习和交流过的张丽娜、刘伟洲、陈超、徐克科、尹潇、吕志鹏、颜琮、胡强、朱聪聪、王岩、卢娟、张丽、李乃一等师兄师姐师弟师妹们。

最后，感谢我的父母和哥哥姐姐，平时对我的嘘寒问暖和给我的无限信任是我科研路上的前进动力。

2017 年 5 月

参考文献

- [1] Allan D W. Time and frequency (time-domain) characterization, estimation, and prediction of precision clocks and oscillators. *Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control IEEE Transactions on*, 1987, 34(6):647.
- [2] Angrisano A, Gaglione S, Gioia C, et al. Assessment of NeQuick ionospheric model for Galileo single-frequency users. *Acta Geophysica*, 2013, 61(6):1457-1476.
- [3] Arbesser-Rastburg B. The Galileo single frequency ionospheric correction algorithm. *European Space Weather Week*. 2006.
- [4] Ashby N. Relativity in the Global Positioning System. *Living Reviews in Relativity*, 2003, 55(1):1.
- [5] Bancroft S. An Algebraic Solution of the GPS Equations. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 1985, 21(1):56-59.
- [6] Banville S. GLONASS ionosphere-free ambiguity resolution for precise point positioning. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(5):487-496.
- [7] BDS IC. <http://beidou.gov.cn/> 2016.
- [8] Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(3):199-202.
- [9] Bock H, Dach R, Jäggi A, et al. High-rate GPS clock corrections from CODE: support of 1 Hz applications. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(11):1083-1094.
- [10] Bock H, Dach R, Jäggi A. Impact of inconsistent use of IERS Conventions on PPP results. *Monografia Monitore Zoologico Italiano*, 2012, 4(3):127-152.
- [11] Boehm J, Niell A, Tregoning P, et al. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 2006, 25(33):-.
- [12] Boehm J, Werl B, Schuh H (2006b). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium - Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2006, 111(B2):1059-1075.
- [13] Boehm J, Heinkelmann R, Schuh H. Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(10):679-683.
- [14] Boehm J, Moeller G, Schindelegger M, et al. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w). *GPS Solutions*, 2015, 19(3):433-441.
- [15] Cai C, Gao Y. Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning. *GPS Solutions*, 2013, 17(2):223-236.
- [16] Cai C, Liu Z, Xia P, et al. Cycle slip detection and repair for undifferenced GPS observations under high ionospheric activity. *GPS Solutions*, 2013, 17(2):247-260.
- [17] Campbell L A, Cook J W, Cunningham K E, et al. Experiences in implementation and use of the square root information filter/smoothing for orbit determination. *Decision and Control, 1988. Proceedings of the, IEEE Conference on. IEEE Xplore*, 1988:831-839 vol.1.
- [18] CAO Y, Hu X, Wu B, et al. The Wide-Area Difference System for the Regional Satellite

- Navigation System of COMPASS. *Sci China-PhysMechAstron*,2012,55:1307-1315.
- [19] Chen G, Hu Z, Wang G, et al. Assessment of BDS Signal-in-Space Accuracy and Standard Positioning Performance During 2013 and 2014. *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings: Volume I*. Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [20] Chen L, Jiao W, Huang X, et al. Study on Signal-In-Space Errors Calculation Method and Statistical Characterization of BeiDou Navigation Satellite System. *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings*. Berlin: Springer, 2013: 423–434.
- [21] Chen J, Xiao P, Zhang Y, et al. GPS/GLONASS System Bias Estimation and Application in GPS/GLONASS Combined Positioning. *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings*. Springer Berlin Heidelberg, 2013:323-333.
- [22] Chen J, Zhang Y, Zhou X, et al. GNSS clock corrections densification at SHAO:from 5 min to 30 s. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2014, 57(1):166-175.
- [23] Chen J, Zhang Y, Wang J, et al. A simplified and unified model of multi-GNSS precise point positioning. *Advances in Space Research*, 2015, 55(1):125-134.
- [24] Chen J, Wang J, Zhang Y, et al. Modeling and Assessment of GPS/BDS Combined Precise Point Positioning:. *Sensors*, 2016, 16(8):1151.
- [25] Choy S, Bisnath S, Rizos C. Uncovering common misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect. *GPS Solutions*, 2017, 21(1):13-22.
- [26] Collins P. Isolating and estimating undifferenced GPS integer ambiguities. *Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation Ntm*, 2008, 4890(504):720-732.
- [27] Dach R, Lutz S, Walser P, et al. Bernese GNSS Software Version 5.2. 2015.
- [28] Dach R, Brockmann E, Schaer S, et al. GNSS processing at CODE: status report. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3):353-365.
- [29] Dai X, Ge M, Lou Y, et al. Estimating the yaw-attitude of BDS IGSO and MEO satellites. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(10): 1005-1018.
- [30] Defraigne P, Baire Q. Combining GPS and GLONASS for time and frequency transfer. *Advances in Space Research*, 2011, 47(2):265–275.
- [31] Deng Z, Ge M, Uhlemann M, et al. Precise orbit determination of Beidou Satellites at GFZ. *EGU General Assembly Conference*. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014.
- [32] DENG Z G, Fritsche Mathias, Uhlemann M, et al. Reprocessing of GFZ Multi-GNSS product GBM[C]// IGS workshop, Sydney, Australia, 2016
- [33] Dilssner, F, Springer T, Schonemann E, et al. Estimation of Satellite Antenna Phase Center Corrections for BeiDou. *IGS workshop, Pasadena,USA*,2014.
- [34] Dong D, Wang M, Chen W, et al. Mitigation of multipath effect in GNSS short baseline positioning by the multipath hemispherical map. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(3):255-262.
- [35] Doucet K, Herwig M, Kipka A, et al. Introducing ambiguity resolution in web-hosted global multi-GNSS precise positioning with trimble RTX-PP. *Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, 2012:1115-1125.
- [36] Feess W, Cox J, Howard E, et al. GPS Inter-Signal Corrections (ISCs) Study. *Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, 2013:951-958.
- [37] Fritsche M. Determination and Maintenance of the Galileo Terrestrial Reference Frame. *EGU General Assembly Conference*. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2016.

- [38] Galileo ICD. <http://galileognss.eu/galileo-os-sis-icd/>, 2015
- [39] Gao Y, Shen X. A New Method for Carrier-Phase-Based Precise Point Positioning. *Navigation*, 2002, 49(2):109-116.
- [40] Ge M, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(7):401-401.
- [41] Gendt G, Altamimi Z, Dach R, et al. GGSP: Realisation and maintenance of the Galileo Terrestrial Reference Frame. *Advances in Space Research*, 2011, 47(2):174-185.
- [42] Geng J, Meng X, Dodson A H, et al. Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(9):569-581.
- [43] Gerald J. Bierman. *Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation*. 1977, New York, Academic Press, 1977
- [44] Giovanni G D, Radicella S M. An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. *Advances in Space Research*, 1990, 10(11):27-30.
- [45] GLONASS ICD. <https://www.glonass-iac.ru>, 2008
- [46] GPS ICD. <http://www.gps.gov/technical/icwg/>, 2012
- [47] Guo J, Xu X, Zhao Q, et al. Precise orbit determination for quad-constellation satellites at Wuhan University: strategy, result validation, and comparison. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(2):1-17.
- [48] Guo J, Chen G, Zhao Q, et al. Comparison of solar radiation pressure models for BDS IGSO and MEO satellites with emphasis on improving orbit quality. *GPS Solutions*, 2016:1-12.
- [49] Guo Q. Precision comparison and analysis of four online free PPP services in static positioning and tropospheric delay estimation. *GPS Solutions*, 2015, 19(4):537-544.
- [50] Hatch R. The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements. *Proc. 3rd Int. Symp. on Satellite Doppler Positioning*, New Mexico, 8-12, Feb. 1982, 1982, -1:1213-1231.
- [51] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3):263-275.
- [52] Herring T A. Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data. *Publications on Geodesy Proceedings of Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy*, 1992, 36:157-164.
- [53] Hernandez-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. The ESA/UPC GNSS-Lab tool (gLAB): An advanced multipurpose package for GNSS data processing. *Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing*. IEEE, 2010:1-8.
- [54] Herring T, King R, McClusky S. *GAMIT Reference Manual*. Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [55] He F, Zhou S, Hu X, et al. Satellite-station time synchronization information based real-time orbit error monitoring and correction of navigation satellite in Beidou System. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2014, 57(7):1395-1403.
- [56] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Wasle, E.. *GNSS - Global Navigation Satellite Systems*. Springer, Vienna, Austria, 2008.
- [57] Hofmann-Wellenhof B, Legat K, Wieser M. *Navigation: principles of positioning and guidance*. Springer, Vienna, Austria, 2003.
- [58] Hu Z, Chen G, Zhang Q, et al. An Initial Evaluation About BDS Navigation Message Accuracy. *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings*. 2013: 479-491.

- [59] IRNSS ICD. <http://irnss.isro.gov.in/>, 2016
- [60] Ishijima Y, Inaba N, Matsumoto A, et al. Design and development of the first Quasi-Zenith Satellite attitude and orbit control system. Aerospace Conference. IEEE, 2009:1-8.
- [61] Jean Y, Dach R(Eds.). IGS Technical Report 2015. University of Bern, 2016.
- [62] Jones A V. Coping with the Atmosphere and Ionosphere in Precise Satellite and Ground Positioning. Environmental Effects on Spacecraft Positioning and Trajectories. American Geophysical Union, 2013:1-16.
- [63] Juan J M, Hernandezpajares M, Sanz J, et al. Enhanced Precise Point Positioning for GNSS Users. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on, 2012, 50(10):4213-4222.
- [64] Klobuchar J A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1987, ae-23(3):325-331.
- [65] Kouba J. A guide to using International GPS Service (IGS) products. IGS Central Bureau, Pasadena, 2015. (http://kb.igs.org/hc/en-us/article_attachments/203088448/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf)
- [66] Lagler K, Schindelegger M, Böhm J, et al. GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. Geophysical Research Letters, 2013, 40(6):1069.
- [67] Leandro R, Langley R B, Santos M C, et al. UNB3m_pack: a neutral atmosphere delay package for radiometric space techniques. Gps Solutions, 2007, 12(1): 65-70.
- [68] Leandro R, Santos M, Langley R B. UNB Neutral Atmosphere Models: Development and Performance. Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation Ntm, 2006, 52(1):564-573.
- [69] Leandro R F, Santos M C, Langley R B. GAPS: The GPS analysis and positioning software - A brief overview. Asme/jsme 2007, Joint Fluids Engineering Conference. 2007.
- [70] Leandro R, Landau H, Nitschke M, et al. RTX positioning: The next generation of cm-accurate real-time GNSS positioning. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001 Report. Conference on. IEEE, 2011:1002-7.
- [71] Laurichesse D, Mercier F, Berthias J P, et al. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination. Navigation, 2009, 56(2):135-149.
- [72] Li M, Qu L, Zhao Q, et al. Precise Point Positioning with the BeiDou Navigation Satellite System[J]. Sensors, 2014, 14(1): 927-943.
- [73] Li W, Yuan Y, Ou J, et al. A new global zenith tropospheric delay model IGGtrop for GNSS applications. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(17): 2132-2139.
- [74] Li W, Yuan Y, Ou J, et al. New versions of the BDS/GNSS zenith tropospheric delay model IGGtrop. Journal of Geodesy, 2015, 89(1):73-80.
- [75] Li X, Zhang X, Ren X, et al. Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. Scientific Reports, 2014, 5:8328.
- [76] Lou Y, Zheng F, Gu S, et al. Multi-GNSS precise point positioning with raw single-frequency and dual-frequency measurement models. GPS Solutions, 2016, 20(4):849-862.
- [77] M. Hernandez-Pajares, J.M. Juan Zornoza, J. Sanz Subirana. GPS data processing: code and phase Algorithms, Techniques and Recipes. Barcelona, Spain, 2005
- [78] Malinowski M, Kwiecień J. A Comparative Study of Precise Point Positioning (PPP)

- Accuracy Using Online Services. Reports on Geodesy & Geoinformatics, 2016, 102.
- [79] Miyazaki S, Iwabuchi T, Heki K, et al. An impact of estimating tropospheric delay gradients on precise positioning in the summer using the Japanese nationwide GPS array. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B7): ETG 3-1.
- [80] Montenbruck O, Ramos-Bosch P. Precision real-time navigation of LEO satellites using global positioning system measurements. GPS Solutions, 2008, 12(3):187-198.
- [81] Montenbruck O, Langley R B, Steigenberger P. First live broadcast of GPS CNAV messages. GPS World, 2013, 24(8):14-15.
- [82] Montenbruck O, Steigenberger P. The BeiDou Navigation Message. Journal of Global Positioning Systems, 2013, 12(1): 1-12.
- [83] Montenbruck O, Hauschild A., Steigenberger P. Differential Code Bias Estimation using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps. Journal of the ION, 2014, 61(3):191-201.
- [84] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. GPS Solutions, 2015a, 19(2):321-333.
- [85] Montenbruck O, Schmid R, Mercier F, et al. GNSS satellite geometry and attitude models. Advances in Space Research, 2015b, 56(6):1015-1029.
- [86] Montenbruck O. The Challenges of a Multi-GNSS Future for IGS. IGS Workshop, Sydney, Australia, 2016.
- [87] Montenbruck O, Steigenberger P, Prange L, et al. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, Prospects and Challenges. Advances in Space Research, 2017.
- [88] Morton Y T, Zhou Q, Frank V G. Assessment of second-order ionosphere error in GPS range observables using Arecibo incoherent scatter radar measurements. Radio Science, 2009, 44(1):328-334.
- [89] Niell A E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1996, 101(B2):3227-3246.
- [90] Pei X, Chen J, Wang J, et al. Application of Inter-system Hardware Delay Bias in GPS/GLONASS PPP. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2012 Proceedings. Springer Berlin Heidelberg, 2012:381-387.
- [91] Penna, Nigel, Dodson, et al. Assessment of EGNOS Tropospheric Correction Model. Journal of Navigation, 2001, 54(1):37-55.
- [92] Petit G, Luzum B, Al E. IERS Conventions (2010). IERS Technical Note, 2010, 36:1 - 95.
- [93] Piriz R, Mozo A, Navarro P, et al. magicGNSS: Precise GNSS Products Out of the Box. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2008.
- [94] QZSS ICD. <http://qzss.go.jp/>, 2013
- [95] Rebischung P, Schmid R. IGS14/igs14.atx: a new framework for the IGS products. AGU 2016 Fall Meeting, San Francisco, 2016.
- [96] Revniviykh S. GLONASS Status and Modernization. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2012, 89(4):839-854.
- [97] RTCA-MOPS. Minimum operational performance standards for Global Positioning System / Wide Area Augmentation System airborne equipment. RTCA DO-229B, Issued 10 June 1999.

- [98] Rülke A, Agrotis L, Enderle W, et al. IGS Real Time Service – Status, Future Tasks and Limitations. IGS Workshop, Sydney, Australia, 2016.
- [99] Schaer S, Gurtner W. IONEX: the IONosphere map exchange, format version 1. IGS AC Workshop, Darmstadt, Germany, February 1998.
- [100] Schaer S, Steigenberger P. Determination and use of GPS differential code bias values. IGS Workshop, 2006.
- [101] Schmid R, Rothacher M. Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites. *Journal of Geodesy*, 2003, 77(7):440-446.
- [102] Schmid R, Dach R, Collilieux X, et al. Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx: status and potential improvements. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(4):343-364.
- [103] Seepersad G, Bisnath S. Challenges in Assessing PPP Performance. *Journal of Applied Geodesy*, 2014, 8(3):205-222.
- [104] Senior K L, Ray J R, Beard R L. Characterization of periodic variations in the GPS satellite clocks. *GPS Solutions*, 2008, 12(3):211-225.
- [105] Shi C, Zhao Q, Lou Y. Recent development of PANDA software in GNSS data processing. *Proc Spie*, 2008, 7285:231-249.
- [106] Söhne W, Dach R, Springer T, et al. Galileo Terrestrial Reference Frame realization and beyond: the GGSP project. EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2009.
- [107] Sterle O, Stopar B, Prešeren P P. Single-frequency precise point positioning: an analytical approach. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(8):793-810.
- [108] Subirana J. Sanz, Juan Zornoza J.M. and Hernández-Pajares M. GNSS Data Processing: Volumn I: Fundamentals and Algorithms. ESA communications, Netherlands, 2013
- [109] Takasu T. Real-time PPP with RTKLIB and IGS real-time satellite orbit and clock. IGS Workshop, 2010.
- [110] Tétreault P, Kouba J, Héroux P, et al. CSRS-PPP: An internet service for GPS user access to the Canadian Spatial Reference frame. *Geomatica*, 2005, 59(1):17-28.
- [111] Urban S E, Seidelmann P K, Sinnott R W. Explanatory supplement to the astronomical almanac(3rd ed.). Mill Valley, California: University Science Books, 2013.
- [112] V. Vdovin, M. Vinogradova. National Reference Systems of the Russian Federation used in GLONASS. 8th ICG meeting, Dubai, November 2013.
- [113] Wang N B, Yuan Y B, LI Z S, et al. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations. *Journal of Geodesy*, 2016, 90:209.
- [114] Wang T C, Collier J B, Ekelund J E, et al. Applications of square-root information filtering and smoothing in spacecraft orbit determination. *Decision and Control, 1988. Proceedings of the, IEEE Conference on. IEEE*, 1988:825-830 vol.1.
- [115] Wang K, Rothacher M. Stochastic modeling of high-stability ground clocks in GPS analysis. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(5):427-437.
- [116] Wang W, Chen G, Guo S, et al. A Study on the Beidou IGSO/MEO Satellite Orbit Determination and Prediction of the Different Yaw Control Mode. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings. Springer Berlin Heidelberg, 2013:31-40.
- [117] Wanninger L. Carrier-phase inter-frequency biases of GLONASS receivers. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(2):139-148.

- [118] WJHT Center. Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service (SPS) Performance Analysis Report. 2017
- [119] Wu J T, Wu S C, Hajj G A, et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Astrodynamics*. *Astrodynamics* 1991, 1992:1647-1660.
- [120] Wu X L, Zhou J H, Gang W, et al. Multipath error detection and correction for GEO/IGSO satellites. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2012, 55(7):1297-1306.
- [121] Wu X, Zhou J, Tang B, et al. Evaluation of COMPASS ionospheric grid. *GPS Solutions*, 2014, 18(4):639-649.
- [122] Xing N, Wu X, Hu X, et al. Secular Changes in Differential Code Bias of COMPASS System. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, 160:243-251.
- [123] Yao Y, Yu C, Hu Y. A New Method to Accelerate PPP Convergence Time by using a Global Zenith Troposphere Delay Estimate Model. *Journal of Navigation*, 2014, 67(5):899-910.
- [124] Zhang Y, Chen J, Wu B, et al. GPS/GLONASS/COMPASS combined positioning based on CNMC. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2014, 305(1):523-532.
- [125] Zhang Y, Chen J, Gong X, et al. Modeling and application of COMPASS satellite orbits and clocks predicted correction. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2014, 304(1-8):181-191.
- [126] Zhang Y, Chen J, YANG S, et al. Initial Assessment of BDS Zone Correction[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2017, 438(1):271-282.
- [127] Zhou S, Hu X, Zhou J, et al. Accuracy Analyses of Precise Orbit Determination and Timing for COMPASS/Beidou-2 4GEO/5IGSO/4MEO Constellation. *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings*. Springer Berlin Heidelberg, 2013:89-102.
- [128] Zhou S S, Hu X G, Rui G, et al. Positioning accuracy assessment for the 4GEO/5IGSO/2MEO constellation of COMPASS. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2012, 55(12):2290-2299.
- [129] Zhu S, Reigber C, König R. Integrated adjustment of CHAMP, GRACE, and GPS data. *Journal of Geodesy*, 2004, 78(1):103-108.
- [130] 蔡诗响, 张小红, 李星星,等. 一种基于多项式拟合的单频周跳探测改进方法. *测绘地理信息*, 2009, 34(5):1-3.
- [131] 常志巧, 胡小工, 郭睿,等. CNMC 与 Hatch 滤波方法比较及其在北斗相对定位中的精度分析. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2015(7):79508-079508.
- [132] 曹月玲. BeiDou 区域导航系统广域差分及完好性监测研究: [博士学位论文].北京: 中国科学院大学, 2014.
- [133] 陈华, 彭利峰, 张彦芬. 一种适合于星间单差精密单点定位的周跳探测方法. *中国卫星导航学术年会电子文集*. 2012.
- [134] 陈俊平, 张益泽, 谢益炳,等. 超大观测网络及多 GNSS 系统的快速数据处理. *武汉大学学报:信息科学版*, 2014, 39(3):253-257.
- [135] 陈俊勇. 中国现代大地基准——中国大地坐标系统 2000(CGCS 2000)及其框架. *测绘学报*, 2008, 37(3):269-271.
- [136] 陈刘成, 胡小工, 封欣,等. 区域导航系统实时广域差分修正模型与方法. *中国科学院上海天文台年刊*, 2010(1):45-53.
- [137] 崔红正, 唐歌实, 宋柏延,等. 北斗卫星导航系统实时定轨与钟差处理策略. *中国空间科学技术*, 2015, 35(5):1-7.
- [138] 段荣, 赵修斌, 庞春雷,等. 一种基于 TurboEdit 改进的 GPS 周跳探测与修复方法. *仪器*

- 仪表学报, 2015, 36(11):2487-2494.
- [139] 范士杰, 陈冠旭, 刘焱雄,等. 低高度角双频非差数据的周跳探测方法研究. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(3):310-315.
- [140] 高星伟, 过静珺, 程鹏飞,等. 基于时空系统统一的北斗与 GPS 融合定位. 测绘学报, 2012, 41(5):743-748.
- [141] 耿涛, 苏醒, 许小龙,等. 北斗卫星导航系统精密定轨和广播星历轨道精度分析. 中国科技论文, 2015(9):1023-1026.
- [142] 郭靖. 姿态、光压和函数模型对导航卫星精密定轨影响的研究: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [143] 韩保民. 精密卫星钟差加密方法及其对星载 GPS 低轨卫星定轨精度影响. 武汉大学学报信息科学版, 2006, 31(12):1075-1078.
- [144] 胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [145] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理(第二版). 武汉大学出版社, 2010.
- [146] 刘万科, 任杰, 曾琪,等. 2013—2015 年 BDS 空间信号测距误差的精度评估. 国防科技大学学报, 2016, 38(3):1-6.
- [147] 罗峰, 姚宜斌, 宋伟伟. 综合利用多项式拟合和载波相位变化率探测单频 GPS 周跳. 全球定位系统, 2007, 32(5):9-13.
- [148] 马卓希, 杨力, 贾小林,等. 基于历元间差分模型的精密钟差加密算法研究. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(5):415-418.
- [149] 毛悦, 宋小勇, 王维,等. 北斗 IGSO/MEO 卫星姿态控制及光压差异分析. 测绘科学, 2015, (08):129-134.
- [150] 毛悦, 宋小勇, 王维,等. IGSO 姿态控制模式切换期间定轨策略研究. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, (11):1352-1356.
- [151] 任晓东, 张柯柯, 李星星,等. BeiDou、Galileo、GLONASS、GPS 多系统融合精密单点. 测绘学报, 2015, 44(12):1307-1313.
- [152] 施闯, 楼益栋, 宋伟伟,等. 广域实时精密定位原型系统及初步结果. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(11):1271-1274.
- [153] 施一民. 现代大地控制测量. 测绘出版社, 2008.
- [154] 宋伟伟. 导航卫星实时精密钟差确定及实时精密单点定位理论方法研究: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- [155] 同济大学. 现代数值数学和计算. 同济大学出版社, 2004.
- [156] 王彬. BDS 在轨卫星钟差特征分析、建模与预报研究: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [157] 王解先, 陈俊平. GPS 精密定位软件研制与应用. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(5):764-767.
- [158] 王宁波, 袁运斌, 张宝成,等. GPS 民用广播星历中 ISC 参数精度分析及其对导航定位的影响. 测绘学报, 2016, 45(8):919-928.
- [159] 王穗辉. 误差理论与测量平差. 同济大学出版社, 2015.
- [160] 吴继忠, 施闯, 方荣新. TurboEdit 单站 GPS 数据周跳探测方法的改进. 武汉大学学报信息科学版, 2011(1):29-33.
- [161] 邢楠. 广域差分技术在 COMPASS 系统定位服务中的应用: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2013.

- [162] 徐维梅, 卢秀山, 郑作亚. 精密单点定位中卫星钟差加密方法的探讨与分析. 测绘科学, 2008(s1):19+38-40.
- [163] 杨元喜. 自适应动态导航定位. 测绘出版社, 2006.
- [164] 杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估. 中国科学:地球科学, 2014(1):72-81.
- [165] 姚宜斌, 何畅勇, 张豹, 等. 一种新的全球对流层天顶延迟模型 GZTD. 地球物理学报, 2013, 56(7):2218-2227.
- [166] 姚宜斌, 胡羽丰, 余琛. 一种改进的全球对流层天顶延迟模型. 测绘学报, 2015, 44(3):242-249.
- [167] 殷海涛, 甘卫军, 肖根如. 恒星日滤波的修正以及对高频 GPS 定位的影响研究. 武汉大学学报信息科学版, 2011, 36(5):609-611.
- [168] 于合理, 郝金明, 刘伟平, 等. 附加原子钟物理模型的 PPP 时间传递算法. 测绘学报, 2016, 45(11):1285-1292.
- [169] 张守建, 李建成, 邢乐林, 等. 两种 IGS 精密星历插值方法的比较分析. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(2):94-94.
- [170] 张小红, 曾琪, 何俊, 等. 构建阈值模型改善 TurboEdit 实时周跳探测. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(3): 285-292.
- [171] 赵铭. 关于 UT0 和 UT1 关系的准确概念. 中国科学院上海天文台年刊, 1992, (00):7-12.
- [172] 赵静晔, 宋淑丽, 陈钦明, 等. 基于垂直剖面函数式的全球对流层天顶延迟模型的建立. 地球物理学报, 2014, 57(10):3140-3153.
- [173] 赵齐乐, 刘经南, 葛茂荣, 施闯. 均方根信息滤波和平滑及其在低轨卫星星载 GPS 精密定轨中的应用. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, (01):12-15.
- [174] 周善石. 简化广域差分 GPS 系统在中国区域的建立与试算: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2007.
- [175] 周善石. 基于区域监测网的卫星导航系统精密定轨方法研究: [博士学位论文]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2011.

附录 数据来源

数据格式

<http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201096516-IGS-Formats>

简化表示

yyyy	年份（四位）	yy	年份（两位）	ddd	年积日（三位）
www	GPS周	wwwd	GPS周，周内天		

RINEX 观测文件

GPS, GLONASS, Galileo:

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/yyyy/ddd/yyo/>

MGEX观测数据

2016年12月之前

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/campaign/mgex/daily/rinex3/yyyy/ddd/yyo/>

2016年12月之后

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/yyyy/ddd/yyd/>

高频观测数据

ftp://igs.bkg.bund.de/IGS/highrate_v3/yyyy/ddd/

RINEX 导航文件

GPS

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/yyyy/ddd/yyn/>

GLONASS

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/yyyy/ddd/yyg/>

MGEX导航文件

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/campaign/mgex/daily/rinex3/yyyy/ddd/yyg/>

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/campaign/mgex/daily/rinex3/yyyy/brdm/>

精密轨道钟差

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/www/>

MGEX精密轨道钟差

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex/www/>

GBU超快速星历

<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/GNSS/products/mgex/>

GLONASS频率变化

http://ionosphere.cn/glonass_frequency_channel

天线文件

<http://www.epncb.oma.be/ftp/station/general/>

<ftp://ftp.igs.org/pub/station/general/>

天线标定

<https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>

对流层文件

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/troposphere/zpd/yyyy/ddd/>

电离层文件

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/yyyy/ddd/>

DCB文件

<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/yyyy/>

MGEX DCB文件

ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE_MGEX/CODE/yyyy/

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex/dcb/>

SINEX文件

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/www/>

海潮系数

<http://holt.oso.chalmers.se/loading/>

EOP

<https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

张益泽, 男, 福建寿宁人, 1990 年 12 月生。

2011 年 7 月毕业于同济大学测绘工程专业 获学士学位。

2011 年 9 月入同济大学读硕士研究生, 2013 年 3 月硕博连读攻读博士学位。

已发表论文:

- [1] **Zhang Y**, Chen J, Yang S, et al. Initial Assessment of BDS Zone Correction[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2017, 438(1):271-282.
- [2] Chen J, Wang J, **Zhang Y**, et al. Modeling and Assessment of GPS/BDS Combined Precise Point Positioning[J]. Sensors, 2016, 16(8):1151.
- [3] Chen J, **Zhang Y**, Yang S. Real-time time and frequency transfer based on Network Solution[C]// IGS Workshop. Sydney, 2016.
- [4] Chen J, **Zhang Y**, Wang J, et al. A simplified and unified model of multi-GNSS precise point positioning[J]. Advances in Space Research, 2015, 55(1):125-134.
- [5] **Zhang Y**, Chen J, Wu B, et al. Estimation of Satellite PCO Offsets for BeiDou based on MGEX Net Solution[J]. EGU. Vienna, 2015
- [6] Chen J, **Zhang Y**, Zhou X, et al. GNSS clock corrections densification at SHAO:from 5 min to 30 s[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2014, 57(1):166-175.
- [7] Chen J, **Zhang Y**, Xie Y, et al. Latest GNSS Results of the CMONOC Network and Its Application in Earthquake Monitoring[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014, 2(1):415-424.
- [8] **Zhang Y**, Chen J, Gong X, et al. Modeling and application of COMPASS satellite orbits and clocks predicted correction[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014, 304(1-8):181-191.
- [9] **Zhang Y**, Chen J, Wu B, et al. GPS/GLONASS/COMPASS combined positioning based on CNMC[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014, 3(1):523-532.
- [10] Chen J, **Zhang Y**, Gong X, et al. Improving Signal in Space (SIS) Performance of BDS[C]// The China Satellite Navigation Conference. 2014.
- [11] Chen J, **Zhang Y**, Xie Y, et al. Improving Efficiency of Data Analysis for Huge GNSS Network[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2013:103-112.
- [12] **张益泽**, 陈俊平, 王解先,等. GSP/BDS 精密高频卫星钟差计算及应用[J].东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(4):673-678.
- [13] **张益泽**, 陈俊平, 周建华, 等.北斗广播星历偏差分析及改正[J].测绘学报, 2016, 45(S2): 64-71
- [14] 陈俊平, **张益泽**, 谢益炳,等. 超大观测网络及多 GNSS 系统的快速数据处理[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2014, 39(3):253-257.
- [15] 陈俊平, **张益泽**, 王君刚,等. 多模精密单点定位中的参数相关性及其统一参数模型[C]// 中国卫星导航学术年会. 2014.
- [16] **张益泽**, 陈俊平, 王解先. 系统偏差在 GPS/GLONASS 组合单点定位中的应用[C]// 中

国卫星导航学术年会. 2013.

- [17] 陈俊平, **张益泽**, 蔺玉亭,等. 一种单站多卫星系统时差监测的新方法[C]// 中国卫星导航学术年会. 2013.
- [18] 陈俊平, **张益泽**, 裴霄,等. 上海天文台陆态网络 GNSS 数据分析中心[J]. 卫星导航, 2013, 创刊号(1).
- [19] **张益泽**, 陈俊平, 王解先,等. 基于历元间差分的 GNSS 精密卫星钟差加密[C]// 中国卫星导航学术年会. 2012.
- [20] **张益泽**, 王解先, 陈俊平,等. 长三角地区梅雨期间大气可降水量的时空特性分析[J]. 中国地球物理 2013——第二十五分会场论文集, 2013.
- [21] **张益泽**, 王解先,裴霄, 等. 利用 GPS 观测资料反演上海上空水汽三维分布[C]// 中国地球物理学会年会. 2012.

待发表论文:

- [1] 陈俊平, **张益泽**, 周建华, 等. 分区综合改正: 服务于北斗分米级星基增强系统的差分改正新模型[J]. 测绘学报 (已接收)

获奖经历:

第八届中国卫星导航年会青年优秀论文二等奖, 2017, 上海
ISGNSS 2015 Scholarship Awarded Paper, 2015, Kyoto
夏坚白测绘优秀青年学生奖学金一等奖, 2014 年
MMT 2013 Best Student Paper Award, 2013, Tainan
同济大学优秀博士新生奖学金, 2013 年

参与科研项目:

- [1] 上海市空间导航与定位技术重点实验室开放课题: 北斗广播星历偏差分析及其应用, 2017-2018, 负责人
- [2] 国家高技术研究发展计划(863): 分米级相位增强信号播发系统技术, 2014-2016, 参与
- [3] 国家自然科学基金: 多 GNSS 系统时空基准的统一, 2013-2016, 参与
- [4] 国家高技术研究发展计划(863): 北斗空间信号精度提升关键技术, 2013-2015, 参与
- [5] 重大专项: 北斗精密定位服务系统数据处理子系统, 2013-2015, 参与
- [6] 重大专项: GNSS 系统时差监测. 2012-2013, 参与

专利:

- [1] 陈俊平, **张益泽**, 杨赛男, 等. 基于分区改正的星基增强系统定位精度提高方法. CN 106125110A[P]. 2016.
- [2] 陈俊平, 杨赛男, **张益泽**, 等. 一种伪距相位综合广域差分改正值的求解方法. CN 105044741A[P]. 2015.
- [3] 王君刚, 王解先, **张益泽**. 一种区域对流层天顶延迟的获取方法. CN 104965207A[P]. 2015.

专著:

陈俊平, **张益泽**. 卫星导航时差测量技术[M]. 测绘出版社, 2017.