



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

北斗分米级星基增强系统关键技术研究及精度评估

作者姓名: 杨 赛 男

指导教师: 陈俊平 研究员 中国科学院上海天文台

曹月玲 副研究员 中国科学院上海天文台

学位类别: 理 学 博 士

学科专业: 天体测量与天体力学

研究所: 中国科学院上海天文台

二〇一七年五月

**Research on BDS Decimeter Level SBAS and Its
Performance Assessment**

By

Sainan YANG

Supervisors:

Prof. Junping CHEN

Associate Prof. Yueling CAO

A Dissertation Submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Doctor of Philosophy

Shanghai Astronomical Observatory

May, 2017

书脊



致 谢

时光飞逝，从我 2012 年进入上海天文台读书以来，至今已经五年。回想这五年，是奋斗、充实又有趣的五年，在这一路上遇到了很多人，给予我关怀和帮助，心中充满无限感激。

在本论文将完成之际，首先衷心地感谢我的导师陈俊平研究员。从 2012 年春季来天文台做本科毕业设计，到博士将要毕业，这 5 年来陈老师对我的专业学习都给予了充分详细的指导。本文是在陈老师的悉心指导下完成的，从论文的选题到论文的撰写，倾注了导师的大量心血。感谢陈老师的信任，博士期间有幸参与系统的建设与维护，使我在工程项目方面积累了一定的经验。同时，恩师渊博的知识、严谨的治学态度、诲人不倦的高尚师德将时刻影响着我。

感谢曹月玲老师，在学业工作的帮助和关心，带我入门和了解了北斗星基增强系统，并在学习研究和项目研制中给予我详细的指导，有时更像一个姐姐，在生活上为我排忧解难。

感谢天文台的胡小工、吴斌、廖新浩、黄乘利、王小亚、周永宏、李力刚、陶金河、齐朝祥等各位老师在学习上的指导和帮助；感谢王慧和储怡老师在学习生活上的关心；感谢张益泽、唐成盼、赵群河、巩秀强、段兵兵、何冰、裴霄、余伟、谢益炳、李茂、王君刚、陈猛、胡一帆、王恒、章洁君、陈倩、李凯、邵璠、单荃等师兄师姐师弟师妹们在学术上的指导和讨论。

感谢北京卫星导航中心的周建华总师、唐波、焦诚、赵鹤、朱伟刚、刘萧、孟方圆、余鑫、姜意、王威、樊家琛、苏冉冉、朱陵凤等工作人员，感谢神州天鸿的陈建兵、苗新潮等合作伙伴，在总站的项目研制让我学习到了很多。

感谢我的 1314 小伙伴们：尼胜楠、郭南男、谭伟杰、仵梦婕，有幸遇到你们，让我在天文台的时候充满许多快乐美好的回忆。感谢昌胜骐、周家晟、刘九龙、朱强等博士硕士同学。

感谢我的家人，感谢我的父母，你们为我付出了太多，在学习上永远支持我，在我遇到挫折的时候鼓励我前进，你们永远是我背后的港湾，希望明天我成为你们的骄傲。

最后感谢所有关心和帮助过我的老师、同学、朋友，谢谢你们！

杨赛男
2017 年 5 月

摘要

20世纪70年代开始，全球导航卫星系统GNSS开始建设，并不断地提升和迅猛发展，目前运行中的全球卫星导航系统包括美国的GPS、俄罗斯的GLONASS、欧洲的GALILEO等卫星导航系统等。现阶段，我国正在实施北斗卫星导航系统的建设，在2012年底，系统已经具备覆盖亚太地区的定位、导航和授时以及短报文通信服务能力。

为了提高卫星导航系统的精度、完好性等性能，满足精密进近民用航空等用户的需求，发展了广域差分系统，即星基增强系统，建立了WAAS、EGNOS等。而我国的北斗卫星区域导航系统在建设之初，采用了不同于GPS等全球卫星导航系统的独特系统设计，在系统设计层面就统一考虑了开放服务和授权服务，其目的是满足不同用户的需求。

本文主要针对我国北斗星基增强系统，研究了北斗分米级星基增强系统的关键技术，重点阐述了卫星钟差改正数和轨道改正数的算法，并对北斗星基增强模型进行详细的分析，利用大量北斗实测数据进行北斗星基增强的试验，对系统进行精度评估。论文的具体研究内容如下：

(1) 回顾了卫星导航系统的发展，介绍了GNSS和星基增强系统的现状，以及北斗广域差分系统的现状。阐述了北斗星基增强系统数据处理中涉及到的坐标系统和时间系统。

(2) 详细介绍了北斗星基增强理论以及数据处理方法。首先阐述了观测值、观测值误差改正模型以及数据的预处理方法，分析了轨道误差对不同测站测距误差影响，轨道径向误差在不同方向造成的测距误差在厘米量级；而卫星轨道径向垂直方向的误差在不同天底角引起的测距误差可达到分米，不可忽略。基于以上分析，北斗广域差分模型增加了三维轨道改正数的求解。另外增加了相位历元间差分数据的处理，避免了因相位数据周跳引起的CNMC重新初始化的问题。

(3) 对星基增强模型进行了各种影响因素的分析：从观测数据采样率、参与解算的监测站的个数分布等角度对模型进行了研究，并对均值预报、线性模型预报2种钟差预报模型进行评估，发现两种钟差预报得到的钟差改正数参数相差厘米量级，相应的在差分用户定位精度影响为厘米，可忽略不计。

(4) 对轨道模型进行分析，讨论计算轨道改正数时卫星轨道改正数的PDOP值合理的约束条件；分析轨道改正数速度项，发现引入轨道改正数速度项对用户站定位精度的影响为毫米到厘米级别，可忽略不计；利用卫星状态转移矩阵作为约束条件，解算卫星的轨道改正数，发现约束前后轨道改正数的值差异在厘米量

级。

(5) 研究伪距偏差对北斗广域差分的影响，分析了伪距偏差的均值、标准差的特性，并根据伪距偏差的特性建立了伪距偏差修正模型。将修正模型应用到北斗广域差分计算中，并利用北斗实测数据进行验证，分析其对用户增强定位的影响；对利用实测气象参数模型计算的对流层延迟量精度进行评估，发现模型计算的对流层延迟精度在分米量级，但是使用不同的对流层延迟计算得到的卫星 UDRE 结果相差几个厘米，因为对流层延迟的差异已被钟差轨道改正数吸收，各自产品之间是自洽的。

(6) 采用北斗实测数据进行北斗星基增强的试验。利用相位历元间差分数据和伪距数据，综合解算差分改正数，提高了差分信息的解算精度。对于 GEO 卫星，卫星 UDRE 提高百分比为 27%，对于 IGSO 卫星，提高百分比为 35%，对于 MEO 卫星，提高百分比为 24%；采用新模型得到的广域差分改正数显著改善了用户定位精度。南北、东西、高程方向的定位精度分别提升了 23%，32% 和 52%；测站三维定位精度提高了 27%；目前北斗单频差分用户使用差分产品进行定位后，平均定位精度达到水平 0.88m，高程 1.28m，三维 1.57m。

(7) 采用 2017 年 3 月的北斗实测数据，对系统进行精度评估。北斗卫星使用星基增强系统生成的钟差和轨道改正数后，对于不同类型的卫星，空间信号精度有不同程度的提升，GEO 卫星信号精度由 1.04m 提升为 0.34m，提升 67%，IGSO 卫星由 0.9m 提升为 0.35m，提升 61%，MEO 卫星由 0.93m 提升为 0.39m，提升 58%；北斗星基增强系统平均的卫星 UDRE 为 0.35m。在我国国土范围内选择不同地理位置的测站，分析长达 1 个月的单/双频差分定位结果，发现定位误差连续稳定，说明北斗星基增强系统提供可靠稳定的服务性能。北斗双频差分用户的定位精度，水平方向为 0.58m，高程为 0.88m，三维精度为 1.07m；单频差分用户的定位精度，水平方向为 0.83m，高程为 1.44m，三维精度为 1.69m。

关键词：北斗，星基增强，轨道改正数，相位历元间差分，精度评估，UDRE

ABSTRACT

GNSS began to be built in the 1970s, continued to improve and gained rapid development. Current global satellite navigation system in operation, consist of the United States GPS, Russia's GLONASS, Europe's GALILEO satellite navigation systems. At the present stage, China is implementing the construction of Beidou satellite navigation system. At the end of 2012, the system already has the capability of positioning, navigation and timing, and short message communication service in the Asia-Pacific region.

In order to improve the accuracy and integrity of the satellite navigation system and to meet the needs of users such as precision approach civil aviation, the Wide-area Differential System is developed, namely, the Satellite-based Augmentation System, such as WAAS, EGNOS and so on. And our Beidou satellite regional navigation system uses a unique system design different from GPS and other global satellite navigation system at the beginning of the construction, which unified the open service and authorized services in the system design, to meet the needs of different users.

Research on BDS Decimeter Level SBAS and Its Performance Assessment

In this paper, we focus on the key technologies of BDS decimeter level SBAS, with an emphasis on the algorithm of satellite clocks and orbit corrections. We analyse the factors influencing BDS SBAS, and carried out lots of tests of BeiDou SBAS model. We also do a research on performance assessment on BDS SBAS. The main contents of the paper are as follows:

(1) We reviewed the development of satellite navigation system, introduced the status of GNSS and satellite-based augmentation system, and the status of Beidou wide-area differential system. The coordinate system and time system involved in the data processing of the BDS SBAS are described.

(2) Details of BDS SBAS theory and data processing methods. Firstly, the observation, the correction model of the observation error and the preprocessing method of the data are expounded. The influence of the orbit error on the ranging error of different stations is analyzed. The ranging error caused by the radial error in different directions is up to centimeters, while the orbit error perpendicular to radial can reach the decimeter and can not be ignored. Based on the above analysis, the

BeiDou wide area differential model increases the calculation of the three-dimensional orbit corrections. In addition, the processing of the differential data between the phases is increased, which avoids the problem of CNMC re-initialization due to the phase data cycles.

(3) Analyze the factors influencing the SBAS model. The factors include the observation data sampling rate and the number distribution of the monitoring stations involved in the calculation. Also the clock correction prediction model is discussed.

(4) Analyze the factors of the orbital correction model. The reasonable constraint condition of the PDOP value of the satellite orbit correction is discussed. The introduced of velocity term of orbit correction affect the user positioning accuracy of centimeters, which is negligible. Using the satellite state transition matrix as the constraint condition, the orbit correction of the satellite is calculated and the difference of orbit corrections with and without the constraint is found to differ in centimeters.

(5) The influence of the code bias on the BDS SBAS is studied. The mean and standard deviation of the pseudorange deviation are analyzed, and the code bias correction model is established according to the characteristics of the code bias. The correction model is applied to the BeiDou wide area differential calculation, and the results of the BeiDou measured data are used to verify the influence of the modified model on the user's positioning.

(6) Lots of tests are carried out in the BDS SBAS by using observation data. By using epoch differenced phase observation and the pseudorange data comprehensively, improves the precision of the differential information. For GEO satellites, the percentage of satellite Mean UDRE using the new algorithm is reduced by 27%, 35% and 27% for GEO, IGSO and MEO satellites. Mean positioning error using the new algorithm is reduced by 23%, 32% and 52% in the North, East and Up components, respectively. Implementing the new algorithm, BDS SBAS service supports the user positioning requirement with accuracy better than 1 meter. At present, the average positioning accuracy of the BeiDou single frequency difference user reaches the level of 0.88/1.28/1.57m in horizontal/elevation/three dimensions direction, respectively.

(7) Using a large number of BeiDou measured data, assess the performance of the BDS SBAS. The accuracy of the GEO satellite signal is increased from 1.04m to 0.34m, IGSO satellite from 0.9m to 0.35m, MEO satellite from 0.93m to 0.39m. The mean UDRE of satellite is 0.35m. With the analysis of single/dual frequency

ABSTRACT

differential positioning results of different stations , we found that the positioning accuracy is stable, indicating that the BDS SBAS provide reliable and stable service performance.

Key Words: BeiDou, Satellite-based Augmentation, Orbit Correction, Epoch-difference of phase, Performance Evaluation, User Differential Range Error

目 录

致 谢	I
摘 要	I
ABSTRACT	I
目 录	I
图表目录	I
缩 略 语	I
1 缇论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外发展现状	2
1.3 本文主要研究内容	4
2 全球导航卫星系统和星基增强系统	5
2.1 全球导航卫星系统概述	5
2.1.1 GPS 系统	5
2.1.2 GLONASS 系统	8
2.1.3 GALILEO 系统	10
2.1.4 北斗卫星导航系统	11
2.2 星基增强系统现状	12
2.2.1 SBAS	12
2.2.2 WAAS	13
2.2.3 EGNOS	15
2.2.4 MSAS	16
2.2.5 GAGAN	17
2.2.6 SDCM	18
2.2.7 北斗广域差分增强系统	19
3 坐标框架和时间系统	21
3.1 时间系统	21
3.1.1 时间系统的定义	21
3.1.2 时间系统之间的转换	23
3.2 坐标系统	24
3.2.1 各坐标系的定义	24
3.2.2 坐标系的转换	25

4	星基增强理论与数据处理方法	27
4.1	观测值	27
4.2	误差改正	28
4.2.1	广播星历和星钟误差	28
4.2.2	相对论改正	32
4.2.3	卫星天线相位中心改正	32
4.2.4	电离层延迟误差	34
4.2.5	对流层延迟误差	37
4.2.6	接收机钟差误差	39
4.2.7	地球自转改正	40
4.2.8	地球固体潮改正	40
4.2.9	伪距多路径观测噪声	41
4.3	观测值数据预处理方法	42
4.3.1	周跳探测	42
4.3.2	相位平滑伪距	44
4.4	轨道改正数模型	46
4.4.1	轨道误差对测距误差的影响分析	46
4.4.2	基本模型	49
4.4.3	相位历元间差分模型	50
4.4.4	伪距相位综合的轨道改正模型	51
4.5	钟差改正数模型	52
4.5.1	基于伪距观测的等效钟差模型	52
4.5.2	伪距相位综合的钟差改正模型	53
4.6	电离层格网模型	55
4.6.1	电离层格网改正模型	56
4.6.2	伪距相位综合的电离层延迟解算算法	59
4.7	小结	61
5	北斗星基增强模型分析	63
5.1	数据及测站分布影响	63
5.1.1	数据采样率	63
5.1.2	测站个数及分布	64
5.2	轨道模型分析	66
5.2.1	轨道改正数 DOP 值结果分析	66
5.2.2	轨道改正数速度项影响分析	69

5.2.3 使用状态转移矩阵约束计算轨道改正数	70
5.3 钟差预报模型分析	74
5.4 伪距偏差对广域差分的影响	77
5.4.1 北斗伪距偏差分析	77
5.4.2 北斗伪距偏差建模	81
5.4.3 北斗实测数据验证	82
5.5 对流层延迟修正误差影响分析	86
5.5.1 对流层延迟量误差分析	86
5.5.2 对流层延迟处理	88
5.6 小结	89
6 北斗星基增强试验与评估	91
6.1 钟差轨道改正数	91
6.1.1 钟差轨道改正数结果	91
6.1.2 钟差轨道改正数结果精度分析	92
6.1.3 双频用户差分定位精度分析	93
6.2 电离层格网改正数	95
6.2.1 电离层格网改正数结果	95
6.2.2 单频用户差分定位结果	95
6.3 北斗星基增强系统空间信号精度评估	97
6.3.1 空间信号精度模型	97
6.3.2 空间信号精度评估结果	98
6.4 北斗星基增强系统定位服务精度评估	100
6.4.1 差分用户定位模型	100
6.4.2 差分用户定位精度分析	101
6.5 小结	106
7 总结与展望	108
7.1 本文主要工作总结	108
7.2 今后研究工作展望	109
参考文献	111
作者简介及在学期间发表的学术论文与研究成果	117

图表目录

图 1 GPS 卫星星座示意图	6
图 2 GPS 监测站分布	6
图 3 不同时期的 GPS 系统 URE 变化情况	7
图 4 GLONASS 定位精度	9
图 5 各 SBAS 系统全球分布图	12
图 6 参考点数据处理流程	14
图 7 主控站数据处理流程	15
图 8 EGNOS 系统空间段覆盖	16
图 9 MSAS 系统构成	17
图 10 SDCM 系统空间段覆盖	19
图 11 定位误差与几何构型和测量误差之间的关系	27
图 12 BDS C07 卫星空间信号误差 SISE 各分量分布示意图	31
图 13 天线相位中心偏差修正误差	34
图 14 测站原始观测 VTEC 与电离层模型计算的 VTEC 结果	37
图 15 伪距观测数据的噪声结果	42
图 16 北斗卫星 CNMC 平滑前后伪距 O-C 的结果	46
图 17 卫星轨道误差对测站测距影响示意图	47
图 18 轨道各分量误差对测站测距影响示意图	48
图 19 电离层格网确定方案流程图	58
图 20 电离层穿刺点可视弧段图	59
图 21 不同数据采样率北斗卫星 UDRE 的 RMS 统计图	64
图 22 选取的北斗观测站分布	65
图 23 不同测站个数分布北斗卫星 UDRE 统计图	65
图 24 PPP 和“倒 PPP”示意图	67
图 25 卫星轨道改正数 DOP 值时间序列	68
图 26 用户站差分服务下有/无轨道改正速度项的定位结果统计	70
图 27 状态转移矩阵约束前后的卫星轨道改正数差异	73
图 28 线性模型预报钟差改正数参数	75
图 29 不同钟差预报模型的钟差改正数结果与差异	76
图 30 北斗精密定轨的伪距偏差单天的均值、标准差序列图	78
图 31 北斗 GEO-02、IGSO-06、MEO-14 卫星 1 个月的伪距残差变化情况	79
图 32 北斗精密定轨的不同类型卫星的伪距偏差结果	80
图 33 IGSO/MEO 卫星高度角结点的伪距偏差结果	82
图 34 1、7、14 号卫星修正伪距偏差前后的卫星等效钟差结果	83
图 35 修正伪距偏差前后北斗卫星 UDRE	84
图 36 测站双频伪距动态增强定位结果比较	85
图 37 用户增强定位误差分布直方图比较	86
图 38 2 号测站斜路径对流层延迟差异	87
图 39 6 号测站斜路径对流层延迟差异	88

图 40 2 种不同对流层延迟计算的卫星 UDRE.....	89
图 41 3 号、7 号卫星差分改正数时间序列图	92
图 42 2016 年 4 月 8 日-2016 年 4 月 17 日各颗卫星 UDRE 结果统计	93
图 43 2016 年 4 月 8 日-2016 年 4 月 17 日用户站差分服务下定位结果统计	94
图 44 格网电离层北斗数据计算结果	95
图 45 单频用户差分定位结果	96
图 46 1-5 号卫星的 1 个月的 RURA 和 UDRE 时间序列图.....	98
图 47 6-10 号卫星的 1 个月的 RURA 和 UDRE 时间序列图.....	99
图 48 11-14 号卫星的 1 个月的 RURA 和 UDRE 时间序列图.....	99
图 49 北方和南方地区测站单频差分定位结果	102
图 50 西部和东北地区测站单频差分定位结果	102
图 51 中部和南海地区测站单频差分定位结果	103
图 52 北方和南方地区测站双频差分定位结果	104
图 53 西部和东北地区测站双频差分定位结果	104
图 54 中部和南海地区测站双频差分定位结果	105
 表 1 GPS 卫星类型	6
表 2 GLONASS 星座状态	8
表 3 用户站差分模型有/无轨道改正速度项的定位平均结果统计(M).....	70
表 4 两组轨道改正数差异统计结果(M).....	74
表 5 不同钟差预报模型的钟差改正数结果差异 RMS 统计 (单位: 米)	76
表 6 北斗精密定轨解算策略	77
表 7 北斗伪距偏差分段线性模型	81
表 8 修正伪距偏差前后的卫星等效钟差差异	83
表 9 修正伪距偏差前后的北斗卫星 UDRE 统计结果	84
表 10 测站双频伪距动态增强定位平均统计结果(M)	85
表 11 用户站 2 种差分模型定位平均结果统计(M)	94
表 12 单频用户差分定位平均结果统计(M)	96
表 13 北斗卫星 2017 年 3 月的 RURA 和 UDRE 统计均值.....	100
表 14 单/双频测站差分定位平均结果统计(M)	105

缩 略 语

BCE	Broadcast Ephemeris	广播星历
CDMA	Code Division Multiple Access	码分多址
CGCS2000	China Geodetic Coordinate System 2000	2000 国家大地坐标系
CNAV	Civil Navigation Message	民用航空导航电文
CNMC	Code Noise and Multipath Correction	伪距噪声多径修正
CVTT	Common View Time Transfer	星共视法时间传递
DOP	Dilution of Precision	精度因子
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service	欧洲地球静止导航重叠服务
FAA	Federal Aviation Administration	联邦航空管理局
FDMA	Frequency Division Multiple Access	频分多址
GAGAN	GPS Aided Geo Augmented Navigation	GPS 辅助静地轨道增强导航系统
GALILEO		欧洲伽利略系统
GEO	Geostationary Earth Orbit	静止地面卫星
GLONASS	Global Navigation Satellite System	全球卫星导航系统
GMST	Greenwich Mean Sidereal Time	格林尼治平恒星时
GNSS	Global Navigation Satellite System	全球卫星导航系统
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
IGSO	Inclined Geostationary Earth Orbit	倾斜轨道静地卫星
IOC	Initial Operational Capability	初始运行能力
LNAV	Legacy Navigation Message	传统导航电文
MCS	Master Control Station	主控站
MEO	Medium Earth Orbit	中轨道卫星
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System	多功能卫星增强系统
MV	Minimum Variance	最小方差
SA	Selective Availability	可用性选择政策
SBAS	Satellite-Based Augmentation System	星基增强系统
SDCM	System for Differential Corrections and Monitoring	差分校正和监测系统

SF	Sidereal Filtering	恒星滤波
SISRE	Signal-in-Space Range Error	空间信号误差
SPS	Standard Positioning Service	标准定位服务
SRDGPS	Single Reference Station Differential GPS	单基准站差分 GPS
UDRE	User Differential Ranging Error	用户差分距离误差
UERE	User Equivalent Range Error	用户等效距离误差
URE	User Range Error	用户距离误差
UEE	User Equipment Error	用户设备误差
USNO	United States Naval Observatory	美国海军天文台
UTC	Coordinated Universal Time	世界协调时
WADGPS	Wide Area Differential GPS	广域差分 GPS

1 绪论

1.1 引言

20世纪70年代开始，全球导航卫星系统GNSS（Global Navigation Satellite System）开始建设，并不断地提升和迅猛发展，目前运行中的全球卫星导航系统包括美国的GPS（Global Positioning System）、俄罗斯的GLONASS（Global Navigation Satellite System）、欧洲的GALILEO等卫星导航系统等（李勇，2007）。现阶段，我国正在实施北斗卫星导航系统的建设，在2012年底，系统已经具备覆盖亚太地区的定位、导航和授时以及短报文通信服务能力，由5GEO+5IGSO+4MEO组成；预计2020年左右，我国将建成由5GEO+30MEO卫星组成的覆盖全球的北斗卫星导航系统。

GNSS技术从最初的航天及军事应用等专业领域，逐步走进人们生活相关的民用领域。在军事领域中，GNSS得到了广泛的应用，与地形匹配技术和激光制导技术相比，GNSS技术具有制导不受雾、烟等外界条件的干扰和影响以及准备工作简单快速等好处。在交通运输业中，GNSS技术能够应用到航空领域、车辆导航和管理方面、水上运输。随着国民经济的发展，私人汽车保有量的不断增长，车载GPS导航已进入普及阶段。在测量领域中，GNSS以全天候、高精度、自动化、高效益等显著特点，赢得广大测绘工作者的信赖。另外GNSS还可应用于精细农业、变形监测、地震海啸的监测等方面（李征航，2013；程世来，2007；刘焱雄，2012；刘文浩，2016）。由此可见，GNSS技术已与人们的生活息息相关，应用范围不断扩大，且用户对于GNSS的导航定位精度需求越来越高。

GPS系统是世界上第一个全球卫星导航系统，1973年开始由美国国防部开始进行研制，并于1993年开始正常运行。在GPS系统建成之初，定位精度可达到15~40m。出于军事安全方面的考虑，在90年代初，美国政府在GPS卫星上实施选择可用性SA（Selective Availability）政策，在GPS卫星的广播星历中的轨道参数加入200m左右的误差，并在卫星钟人为地加入一种伪随机抖动，使得当时的GPS用户定位精度降低为100~200m左右（李征航，2013；周善石，2007）。为了消除SA政策带来的各种问题，广大用户展开许多研究和试验工作，差分GPS技术应运而生。虽然美国已于2000年终止了SA政策，但是差分技术仍能有效提高实时单点定位用户的定位精度，因此差分GPS技术仍在迅速发展。

目前GNSS应用最广泛的用户实时导航定位，用户定位时使用的是卫星实时

播发的广播星历信息。广播星历为预报星历, GPS 每 2 小时更新一次, 北斗每 1 小时更新一次。广播星历预报的卫星轨道和卫星钟差存在误差, 许多学者对 GNSS 的卫星广播星历精度进行了评估, 从卫星广播星历精度长期变化趋势来看, 广播星历的精度都在不断提升, 目前 GPS 的卫星平均广播星历精度约为 0.69m, GLONASS 的平均广播星历精度约为 1.93m, GALILEO 的平均广播星历精度约为 1.58m, 北斗的平均广播星历精度约为 1.66m (李征航, 2008; 潘林; 2014; 曾琪, 2016; Montenbruck O, 2015)。星历误差、卫星钟差误差和伪距测量误差是影响导航用户定位精度的主要因素 (Zhou S S, 2011; 陈金平, 2001)。因此研究星基增强广域差分技术仍是专家学者研究的重点。

1.2 国内外发展现状

差分 GPS 技术的基本工作原理在于, GPS 定位的观测误差(卫星星历误差、卫星钟差、大气延迟等误差)具有较强的空间相关性, 因此距离相差不远的 2 个测站的 GPS 观测误差的影响大致相同。若其中 1 个测站已知精确坐标(基准站), 可求得 GPS 观测误差对测站坐标的影响, 通过数据链路将求得的误差改正数发送给另 1 个测站(用户站), 用户站在定位时可加上误差改正数的修正, 就能够消除大部分相同的观测误差, 用户定位精度从而能够得到提升。发送的误差改正数可以是位置差分, 也可以是距离差分, 或者是将各误差源(轨道误差、星钟误差、大气延迟)进行分类的差分改正数。差分 GPS 根据其工作原理和数学模型的不同可分为三类: 单基准站差分 GPS (SRDGPS, Single Reference Station Differential GPS)、具有多个基准站的局部差分 GPS (LADGPS, Local Area DGPS) 和广域差分 GPS (WADGPS, Wide Area Differential GPS)。局域差分 GPS 作用范围较小, 通常作用范围在 100km 左右 (周善石, 2007), 随着距离的增加, 用户站与基准站的观测误差的空间相关性相应地降低, 差分 GPS 的效果也随之减弱, 用户得到的定位精度随着站间距离的增加而降低。

广域差分 GPS 最早由 Kee C 等人最先提出 (C Kee, 1991), 当时 GPS 已经是比较精确的定位传感系统, 但是在某些情况下, 例如飞机精密进近和着陆, 需要更高的精度。传统的差分 GPS 的作用范围在 100km 左右, 若在大范围地区实施差分 GPS, 需要布设很多的参考站, 这需要大量的人力和资金投入, 因此 Kee C 等人提出了广域差分增强系统, 也即星基增强系统 (SBAS, Satellite-based Augmentation System)。星基增强系统的优点在于作用范围广泛, 一般超过 1000km 甚至全球范围, 发播的差分改正数主要针对具体的误差源提供改正信息, 这样的差分方式定位精度不受距离限制。星基增强系统能够大大减少监测站的个

数, 节约大量资金。Kee C 提出在美国地区分布建立 15 个测站, 包括主控站和监测站, 各地的基准站对 GNSS 卫星进行连续观测, 主控站负责计算差分改正数, 包含卫星轨道改正数、卫星钟差改正数和电离层改正数, 利用专用卫星将这些改正数发送给用户。用户利用这些改正数对测得的观测量进行修正, 最后计算出点位坐标, 精度可达到 1~2m 左右 (C Kee, 1991)。Tsai Y J 等人阐述了 WAAS 系统中卫星三维轨道改正数和卫星钟差改正数的求解方法, 利用伪距观测值进行单差数据处理, 消除卫星钟差改正数参数, 根据最小方差 (Minimum-Variance, MV) 算法解算三维的卫星轨道改正数, 将求解的卫星轨道改正数作为已知值固定, 再计算卫星钟差改正数 (Tsai Y J, 1999)。此方法对地面的几何构型比较敏感, 且容易受伪距噪声的影响。Chao Y C 等人对广域差分中电离层格网的模型以及频间偏差校正模型进行了深入的研究, 并提出了一种反馈算法计算电离层改正值的置信度 (Chao Y C, 1999)。另外, 有学者对星基增强系统 WAAS 等发播的差分改正数进行评估, 分析了美国 WAAS 和日本 MSAS 发播的差分改正数校正的准确性, 发现 SBAS 的卫星轨道改正数和钟差改正数高度相关, 差分改正数的准确性取决于 SBAS 地面网络的大小和轨道轨迹 (Jeong M S, 2009)。Heßelbarth A 等人还将星基增强系统发播的改正数应用到用户双频 PPP 定位中, 其中 WAAS 的改正数用于 PPP 的定位精度最高, 24h 的静态定位精度优于 10cm, 2h 的动态定位结果优于 30cm, EGNOS 和 MSAS 的改正数 PPP 的定位误差是 WAAS 的 2~4 倍 (Heßelbarth A, 2012)。

而我国的北斗卫星区域导航系统在建设之初, 采用了不同于 GPS 等全球卫星导航系统的独特系统设计, 在系统设计层面就统一考虑了开放服务和授权服务, 其目的是满足不同用户的需求。国内学者针对北斗星基增强系统也有了初步研究, 在北斗二代初期, 北斗星基增强系统采用等效钟差方式一维差分改正模型, 对授权用户发播一维的等效钟差改正, 统一修正卫星星历径向误差和卫星钟差误差, 同时消除星历切向、法线方向误差在各站视线方向的平均误差 (陈刘成, 2010; Cao Y L, 2012)。北斗区域卫星导航系统采用独立的时间同步体系向用户提供导航电文中的卫星钟差信息 (Yang W, 2013; Zhou S S, 2016), 曹月玲提出了基于星地时间同步的运动学四维差分改正算法, 研究利用区域导航系统星地双向时间同步观测分离钟差误差, 不依赖卫星轨道动力学建模而仅采用运动学平滑单点倒定位的方法, 成功分离了星历和星钟误差 (Cao Yueling, 2013; 曹月玲, 2014), 但是此方法严重依赖实时的卫星时间同步钟差结果, 一旦卫星时间同步钟差结果中断, 无法解算分离的卫星轨道改正数和钟差改正数。吴晓莉等人对北斗星基增强系统的电离层格网改正做了相应的研究和评估。在基本导航中, 北斗播发 8 参的电离层模型参数, 授权用户接收电离层格网改正信息 (Wu X, 2013)。在大

部分星基增强系统中，电离层格网点的分辨率为 $5^\circ \times 5^\circ$ （纬度×经度），而北斗的电离层格网点的分辨率为 $2.5^\circ \times 5^\circ$ （纬度×经度），加密的格网点使得电离层改正值经度提高了0.2m，在中低纬度地区，用户单频增强定位的三维精度提高了1m；在除了东北、西北监测站稀疏的其他中国区域，电离层格网的可用性高于95% (Wu X L, 2014)。

1.3 本文主要研究内容

本文主要针对我国北斗区域卫星导航系统的建设，研究了北斗星基增强系统的关键技术，重点针对卫星钟差改正数和轨道改正数的算法，并对北斗星基增强系统进行精度评估。论文共分为7章，具体结构内容如下：

第1章和第2章主要阐述了论文的背景，差分GPS技术的发展，以及星基增强系统的由来，国内外专家、学者对星基增强系统的研究；简单介绍了全球卫星导航系统和现有的星基增强系统的现状。第3章对本论文星基增强系统算法中涉及到的时空坐标系统进行简单的描述。

第4章详细说明了目前星基增强系统的理论与处理方法，包括观测数据的预处理，以及北斗二代一期时使用的一维等效钟差模型。为了提高北斗星基增强系统服务的精度，本文数据处理中综合了伪距及相位观测数据，为了解决轨道误差在不同视线方向投影误差不同的问题，在北斗星基增强系统发播的改正数中新增了三维轨道改正数的求解。本文提出的新算法已经应用于北斗分米级星基增强系统中。

第5章对新模型的影响因素进行了详细的分析，包括数据采样率、测站个数及分布；在求解轨道改正数时，分析了轨道改正数速度项、轨道改正数DOP值，并尝试用状态转移矩阵约束解算轨道改正数；根据北斗用户ICD文件中差分改正数发播的频率，钟差改正数的预报模型；研究了伪距波动的影响以及对流层误差对广域差分性能的影响。

第6章中利用本文提出的广域差分模型，利用北斗实测数据进行北斗星基增强实验分析；并评估了北斗星基增强系统的长期服务精度，对系统的卫星信号精度进行长期的结果统计，并对用户的单双频的普通/增强定位的结果进行统计。

第7章总结了本论文的主要工作，并对未来工作进行展望。

2 全球导航卫星系统和星基增强系统

2.1 全球导航卫星系统概述

全球导航卫星系统 GNSS 是一种空基无线电导航系统，它具有全天候、全球性、实时性和高精度等优点，能够为在近地空间以及地球表面上的任何位置的用户提供全天候的三维坐标、速度信息以及时间信息（宁津生，2013）。美国的全球定位系统 GPS 为世界上第 1 个正式运行的全球导航卫星系统，它目前已在发展成熟阶段。出于军事安全等因素的考虑，其他国家也相继发展了自己的卫星导航系统，例如 GLONASS、GALILEO、BeiDou 等。本小节对世界上主要的卫星导航系统的现状作简单的介绍。

2.1.1 GPS 系统

GPS 是世界上第 1 个连续运行的全球卫星导航定位系统，由美国政府于 20 世纪 70 年代开始进行研制，并于 1994 年全面建成。

GPS 系统由以下三部分组成：空间部分（GPS 卫星）、地面监控部分和用户部分。GPS 卫星星座由 24 颗卫星组成，其中 21 颗为工作卫星，3 颗为备用卫星。24 颗卫星均匀分布在 6 个轨道平面上，即每个轨道面上有 4 颗卫星，如图 1 所示。这种布局的目的是保证在全球任何地点、任何时刻至少可以观测到 4 颗卫星。GPS 系统实质是通过时间测量信号，进行空间距离交会进行定位的。GPS 使用码分多址（CDMA, Code Division Multiple Access）技术来区分不同卫星的信号，采用的坐标基准是 WGS-84 地固坐标系，时间基准与原子时相关，为协调世界时间（UTC, Coordinated Universal Time），由美国海军天文台（USNO, United States Naval Observatory）维护。由 GPS 系统的工作原理可知，星载时钟的精确度越高，其定位精度也越高。早期试验型卫星采用由霍普金斯大学研制的石英振荡器，相对频率稳定度为 10^{-11} /秒。误差为 14m。1974 年以后，GPS 卫星采用铷原子钟，相对频率稳定度达到 10^{-12} /秒，误差 8m。1977 年，BLOCK II 型采用了马斯频率和时间系统公司研制的铯原子钟后相对稳定频率达到 10^{-13} /秒，误差则降为 2.9m。1981 年，休斯公司研制的相对稳定频率为 10^{-14} /秒的氢原子钟使 BLOCK IIR 型卫星误差仅为 1m。目前 GPS 星座混合了新旧卫星，卫星类型包括 Block IIR、Block IIR(M) 和 Block IIF（Wikipedia, 2017a）。截止 2017 年 1 月 20 号，GPS 星座目前有 31 颗在轨运行卫星，详细情况如下表所示（GPS 官网，2017）。

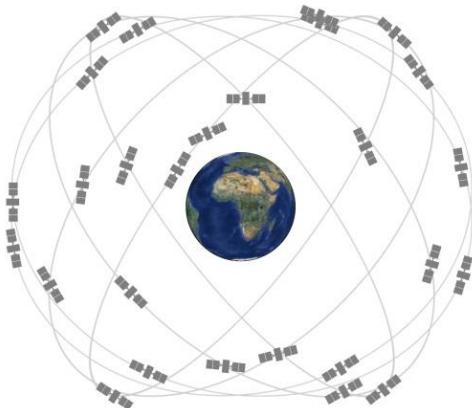


图 1 GPS 卫星星座示意图

表 1 GPS 卫星类型

卫星类型	Block IIR	Block IIR(M)	Block IIF
信号	L1 C/A, L1/L2 P(Y)	L1 C/A, L1/L2 P(Y), L2C, L1/L2 M	L1 C/A, L1/L2 P(Y), L2C, L1/L2 M, L5
发射时间	1997-2004	2005-2009	2010-2016
在轨个数	12	7	12

地面监控部分主要由 1 个主控站（Master Control Station，简称 MCS）、4 个地面天线站（Ground Antenna）和 6 个监测站（Monitor Station）组成，后期增加了 NGA 的监测站作为 GPS 卫星监测站（GPS 官网，2017）。

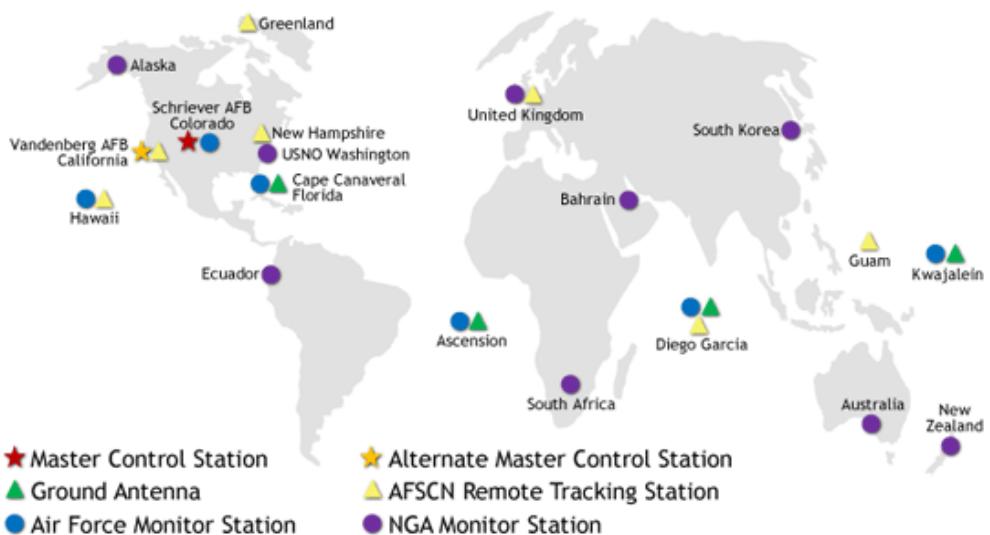


图 2 GPS 监测站分布（GPS 官网，2017）

卫星空间信号精度 SISRE（Signal-in-Space Range Error）反映了卫星广播星历和钟差的精度，受空间段卫星特征（如：星钟的稳定性、轨道运动的可预报性

等) 和地面监控部分(如: 轨道和星钟的测定性能、监测站的分布等) 的影响。GPS 系统的信号精度比 SPS 公布的标准要高, 且用户距离误差(User Range Error, URE) 在逐步提升, 2001 年 GPS 的 URE 水平达到了 1.6 米, 2007 年, URE 已经达到了 1 米, 到 2016 年 URE 已经提升到 0.6 米, 图 3 给出了不同时期的 GPS 系统 URE 变化的具体情况。1997 年, 地面控制部分修正了卡尔曼滤波器, 提高了轨道精度, 增加了 6 个 NIMA 监测站作为 GPS 卫星监测站, 并实施一种新的导航上传方案, 减少了预报误差(Creel T, 2006)。2005 年以来, 改善了 MCS 卡尔曼滤波器中的太阳辐射压力模型, 增加 NGA 的观测站为 GPS 卫星监测站(Creel T, 2007)。GPS 的最新性能报告显示 2012-2013 时间段的星座平均 SISRE 约为 0.7 米(Gruber, 2012; Cooley, 2013), 这得益于新一代卫星不断更换旧的 Block IIA 卫星。尽管没有揭示分析的细节, 但是对于使用了最新一代铷原子钟的 Block IIF 卫星的 SISRE 仅为 0.35 米(Montenbruck O, 2015)。GPS 目前的 SISRE 已经达到了 0.6m 的精度, 且轨道的精度为 0.2m (Montenbruck O, 2017)。而 GPS 播发的民用航空(CNAV, Civil Navigation Message)信息相对于 LNAV(Legacy Navigation Message)频率较低, 且目前的 SISRE 精度也与 LNAV 的精度处于同一水平, 大约为 0.6 米(Steigenberger P, 2015)。

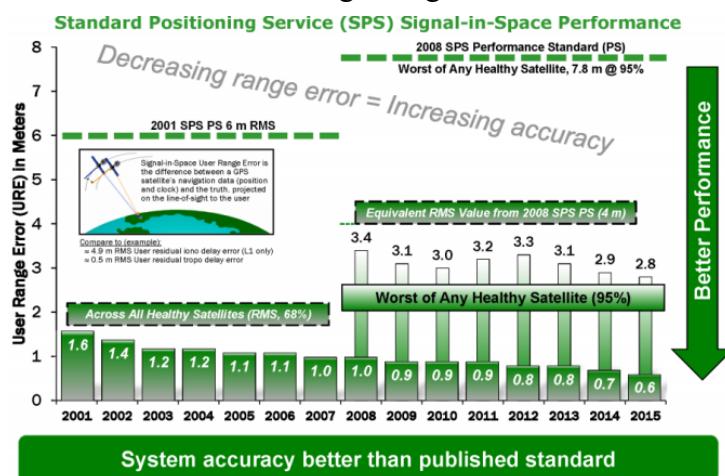


图 3 不同时期的 GPS 系统 URE 变化情况(GPS 官网, 2016)

为了保持美国 GPS 在卫星导航系统的服务, 提供和使用方面的领先地位, 美国政府正积极实施 GPS 现代化, 通过提高 GPS 服务的性能来满足不断增长的需求, 并保持与国际卫星导航系统的竞争力。GPS 现代化计划的重点之一是向卫星星座增加新的导航民用信号。政府将实施 4 种新的民用信号: L1、L2C、L5 和 L1C。L1 号称为 L1C/A 或 C/A, 为传统的民用信号。L2C 是第二个民用 GPS 信号, 专为满足商业需要而设计, 对于现有双频操作的专业用户, L2C 可提供更快的信号采集, 更高的可靠性和更大的操作范围。L2C 以比传统 L1C/A 信号更高的有效功率进行广播, 使其更容易在树下甚至室内接收。2014 年 4 月, 空军

开始在 L2C 和 L5 信号上播放民用航空 (CNAV) 信息。2014 年 12 月 31 日，空军开始每天发送 CNAV 上传，L2C 仍被认为是试运营期间。L5 是第三个民用 GPS 信号，旨在满足生命安全运输和其他高性能应用的苛刻要求 (Qian X, 2016; Lee J H, 2016; Saleem T, 2017)。L1C 是第四个民用 GPS 信号，旨在实现 GPS 与国际卫星导航系统之间的互操作性。作为全球定位系统现代化计划的一部分，美国在过去几年不断升级 GPS 控制部分，并将在未来几年继续保持下去。另外 GPS 现代化计划还包括发展新一代的 GPS 卫星 GPS III，信号包含 Block IIF 的所有信号，并新增 L1C 信用信号。

2.1.2 GLONASS 系统

1978 年前苏联开始研发类似于 GPS 系统的全球导航卫星系统(GLONASS, Global Navigation Satellite System) 系统，从 1982 年 12 月 12 日开始，该系统的导航卫星不断得到补充。苏联解体后一度丧失大多数卫星与功能，之后由俄罗斯维护运作，至 1995 年，该系统卫星在数目上基本上得到完善。但随着俄罗斯经济不断走低，该系统也因此因失修等原因陷入崩溃的边缘。但 2001 年到 2010 年 10 月俄罗斯政府已经补齐了该系统需要的 24 颗卫星，GLONASS 已经实现了 100% 的俄罗斯领土覆盖。而在 2011 年 10 月，24 颗卫星的全轨道星座得到恢复，全面覆盖全球。该系统包含的 24 颗卫星（其中包括 3 颗备用卫星），均匀分布于 3 个轨道面。轨道倾角约 64.8° ，标称轨道高度为 19100 公里，轨道周期为 11 小时 15 分 44 秒。由于卫星轨道倾角大于 GPS 倾角，所以在高纬度 (50° 以上) 地区的卫星可视性要比 GPS 好。GLONASS 使用频分多址 (FDMA, Frequency Division Multiple Access) 技术来区分不同卫星的信号。GLONASS 卫星的设计已经进行了多次升级，卫星类型包括 GLONASS、GLONASS-M、GLONASS-K、GLONASS-K2，目前 GLONASS 类型的卫星已经全部退役，GLONASS-M 正在使用中，GLONASS-K 仍处于在轨验证的设计成熟阶段，GLONASS-K2 正处于开发中。截至 2016 年 10 月，GLONASS 系统的卫星星座状态如表 1 所示。

表 2 GLONASS 星座状态

卫星类型	M	M+	K
信号	L1/L2 C/A & P	L1/L2 C/A & P, L3	L1/L2 C/A & P, L3
在轨个数	23	1	1+(1)

GLONASS 的地面监控系统有 5 个跟踪站、9 个监测站和 1 个主控站，它们均设于前苏联本土。用户可以通过接收调制在两个载频上的民用测距码和高精度测距码以及卫星星历等导航信息实现定位，其算法与 GPS 定位算法类似。在技

术方面, GLONASS 与 GPS 有以下几点不同之处: (1) 卫星发射频率: GPS 的卫星信号采用码分多址(CDMA)体制, 每颗卫星的信号频率和调制方式相同, 不同卫星的信号靠不同的伪码区分。而 GLONASS 采用频分多址(FDMA)体制, 卫星靠频率不同来区分, 每组频率的伪随机码相同。基于这个原因, GLONASS 可以防止整个卫星导航系统同时被敌方干扰, 因而具有更强的抗干扰能力。(2) GPS 使用世界大地坐标系(WGS84), 而 GLONASS 使用的则是 1990 年苏联官方所制定的 PZ-90 参考坐标系。(3) GPS 系统时与世界标准时间(UTC)相关联, 而 GLONASS 所用的时间系统是前苏联自己维持的 UTC 时间, 除了存在跳秒之外, 与 GPS 时间之间还有数十纳秒的差异 (Wikipedia, 2017b)。

GLONASS 目前的星历精度, 只能对近几年的广播星历表现进行分析。自 2011 年 12 月 GLONASS 系统实现不间断的全球定位服务以来, GLONASS 用户可实现的定位精度从 2008 年的 20 米逐渐提高到目前的 3 米(Revnivykh, 2011)。据 Revnivykh (2012) 的分析, 2011-2012 年期间 GLONASS 的平均 SISRE 约为 1.5 米, 其中轨道部分的 SISRE 仅为 0.7 米, 但并未进一步说明所采用的分析公式和数据等细节。Heng (2011) 等人独立研究了 GLONASS 信号空间的轨道误差, 在 2009-2011 年间轨道精度优于 1 米, 另外补充了对 GLONASS 卫星星钟的研究, GLONASS 所有卫星的 SISRE 达到 1-4 米 (Heng L, 2012)。GLONASS 铷钟的稳定性较低, 造成最大 SISRE 超过 2 米 (Montenbruck O, 2017)。

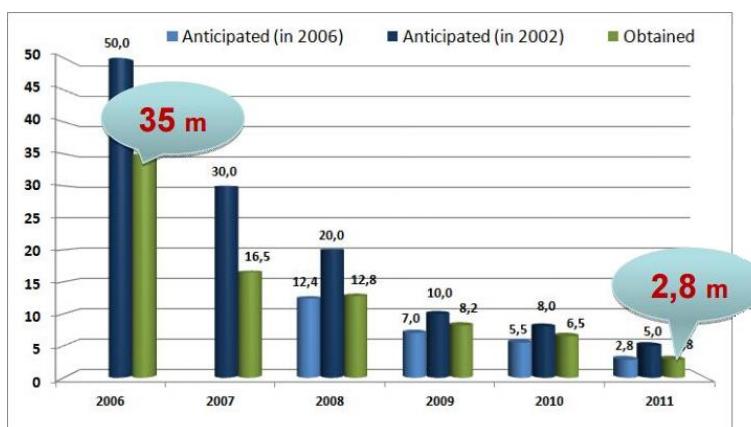


图 4 GLONASS 定位精度

GLONASS 为了提高服务精度, 正在积极推行 GLONASS 现代化。GLONASS 星座已经包括一个现代化的 GLONASS-M+卫星和两颗 GLONASS-K1 卫星。除了卫星间链路, 激光时间传输能力和/或改进的时钟等先进功能之外, 新的 GLONASS 卫星还支持传输新的 L3 码分多址 (CDMA) 信号, 与现有的 L1 和 L2 信号相干 (Urlichich Y, 2011; Zaminpardaz S, 2016)。但是到目前为止, L3 信号仍缺乏官方界面控制文件 (ICD), 并且在 10 年以内 GLONASS 星座不会全

部覆盖 L3 信号。

2.1.3 GALILEO 系统

伽利略是欧洲的全球卫星导航系统 (GNSS)，为用户提供更好的定位和定时信息，对许多欧洲的服务和用户具有重大的积极影响。

伽利略计划是欧盟 2002 年正式批准的一项战略科研项目，目标是建成一个覆盖全球的卫星导航系统，以打破美国拥有的 GPS 全球卫星定位系统的垄断地位。伽利略系统的目的之一是为欧盟国家提供一个自主的高精度定位系统，该系统独立于俄罗斯的 GLONASS 和美国的 GPS 系统，在这些系统被关闭时，欧盟就可以使用伽利略系统。伽利略系统的目标是在水平和垂直方向提供精度 1 米以内的定位服务，并且在高纬度地区提供比其他系统更好的定位服务。

伽利略系统的第一颗试验卫星 GIOVE-A 于 2005 年 12 月 28 日发射，第一颗正式卫星于 2011 年 8 月 21 日发射。该系统计划发射 30 颗卫星，截止 2016 年 5 月，已有 14 颗卫星发射入轨。伽利略系统于 2016 年 12 月 15 日在布鲁塞尔举行启用仪式，提供早期服务。于 2017 年到 2018 年提供初步工作服务，最终于 2019 年具备完全工作能力。该系统的 30 颗卫星预计将于 2020 年前发射完成，其中包含 24 颗工作卫星和 6 颗备份卫星。卫星采用中等地球轨道，均匀地分布在 3 个轨道面上轨道倾角为 56° ，轨道高度约为 2.3 万公里 (Wikipedia, 2017c)。

GALILEO 采用坐标系统是伽利略地面参考系统 (GRTF, Galileo Terrestrial Reference Frame)，GRTF 与国际地球自转服务 IERS 建立的国际地面参考系 (ITRF, International Terrestrial Reference Frame) 相关联 (Hein G W, 2009)，与最新的 ITRF 之间的差异不超过 3 厘米 (2σ)。GRTF 由 GGSP 负责定义、实施和维护。伽利略时间系统 (GST, Galileo System Time) 是一个连续的原子时，与 TAI 之间存在常数偏差。

2016 年 12 月 15 日，伽利略声称具备初始运营能力 (IOC, Initial Operational Capability)，目前提供的服务是开放服务，公共管理服务和搜索和救援服务。伽利略目前健康的在轨运行卫星有 15 颗，其中 3 颗属于第一代在轨验证卫星，另外 12 颗是 FOC (Full Operational Capability) 卫星。自从信号开始正常传输以来，伽利略广播星历和星钟的质量已经有了很大改善，空间信号精度已经达到 30cm 左右。其他科学机构应用合适的太阳辐射压力模型得到的伽利略精密产品卫星轨道精度能达到 5cm，这对星钟的稳定度也同样重要。利用伽利略广播星历和星钟双频单点定位的精度已经达到米级；伽利略 PPP 在静态模式下能达到 2cm 的精度。(Steigenberger P, 2016)

2.1.4 北斗卫星导航系统

中国自主研发了北斗卫星导航系统，北斗系统主要分为以下 3 个发展阶段。

第一阶段，中国于 2000 年 10 月 31 日和 12 月 21 日相继成功发射两颗导航定位试验卫星，2003 年又发射了一颗，完成北斗一号的建设。北斗导航系统属于区域性导航卫星系统，它的系统构成包括三颗地球静止卫星（两颗工作、一颗备用）、一个装备有三维电子地图的地面中心站、若干个分布全国的参考站以及用户机等软硬件设备。它使用有源定位：以两颗卫星的已知坐标为圆心，以测定的双星到用户机的距离为半径，这时可以形成两个圆球面，而用户机必定位于这两个球面相交的大圆上，这个大圆称作“交线圆”。利用数字化地形图提供一个以地心为球心，以球心至地表高度为半径的非均匀三维球面，从而中心控制系统可最终计算出用户所在点的三维坐标，这个坐标经加密由出站信号发送给用户。坐标系统采用北京 54 坐标系（刑楠，2014）。

在第二阶段，中国发展和建立了世界上第 3 个卫星导航系统—北斗区域卫星导航系统 BDS (BeiDou Navigation Satellite System)，在 2012 年底之前完成 5 颗 GEO(Geostationary Earth Orbit) 卫星、5 颗 IGSO(Inclined Geostationary Earth Orbit) 卫星和 4 颗 MEO(Medium Earth Orbit) 卫星的组网，向亚太部分地区提供服务，用户定位精度优于 10m，测速精度优于 0.2m/s，授时精度优于 10ns。

北斗卫星导航系统采用了不同于 GPS 等系统的独特系统设计，采用更适用于区域卫星导航服务的 GEO 卫星和 IGSO 卫星、联合 MEO 卫星的星座设计。GEO 卫星轨道高度 35786 千米，分别定点于东经 58.75 度、80 度、110.5 度、140 度和 160 度；MEO 卫星轨道高度 21528 千米，轨道倾角 55 度；IGSO 卫星轨道高度 35786 千米，轨道倾角 55 度。北斗区域系统在 L 波段发射 B1、B2、B3 的服务信号，频率分别为 1561.098、1207.14、1268.52MHz，是第一个所有卫星提供 3 频信号的系统。北斗系统采用 2000 中国大地坐标系 (CGCS2000)，时间基准为北斗时 (BDT) (北斗 ICD, 2012)。

目前北斗监测站仅分布在中国国土范围内，受限于监测站分布的约束，主控站的数据处理对于 MEO 卫星的可视弧段较短，IGSO 卫星也存在较为频繁的出入境情况，而 GEO 卫星几何位置相对于地面监测站是静止的，使得卫星轨道和卫星钟差解算高度相关 (Zhou S S, 2011; 施闯, 2012; 刘伟平, 2014, 2016; 雷辉, 2011; 耿涛, 2011; 陈良, 2016)。以上情况都对北斗系统数据处理及高精度服务提出了很高的挑战。相关学者专家对北斗广播星历的精度进行评估，轨道径向误差达到 0.5m，空间信号精度平均为 1.46m (Montenbruck O, 2015)。

到第三阶段，在 2020 年左右中国将要建成服务全球的北斗卫星导航系统。

系统由空间段、地面段和用户段三部分组成，空间段包括 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星（27MEO+3IGSO），地面段包括主控站、注入站和监测站等若干个地面站，用户段包括北斗用户终端以及与其他卫星导航系统兼容的终端。

2.2 星基增强系统现状

2.2.1 SBAS

单纯依靠 GPS 和 GLONASS 的定位服务，无法满足一些对定位精度要求比较高的应用需求，不适用于民用航空，特别是航空领域的飞机精密进近等。港口入口或内陆航道导航等重要的海事应用也可能无法依赖于 GPS/GLONASS 的性能，其位置精度和完好性都不符合用户要求。因此，针对这种需求，尤其是来自航空业的迫切需要，许多国家都发展了自己的卫星导航增强系统，为用户提供差分信息以及完好性信息，使得 GNSS 信号可用于安全关键的操作。

SBAS (Satellite-Based Augmentation System)，即星基增强系统，是利用地球静止轨道卫星建立的地区性广域差分增强系统。通过 GEO 卫星搭载卫星导航增强信号转发器，可以向用户播发星历误差、卫星钟差、电离层延迟等多种修正信息，实现对于原有卫星导航系统定位精度的改进，从而成为各航天大国竞相发展的手段。目前，全球已经建立起了多个 SBAS 系统，如美国的 WAAS (Wide Area Augmentation System)，覆盖美洲大陆；欧洲的 EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)，覆盖欧洲大陆；日本的 MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System)，覆盖亚洲大陆；印度的 GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation)，覆盖印度地区；俄罗斯的 SDCM (System for Differential Corrections and Monitoring)，覆盖俄罗斯及东欧地区。

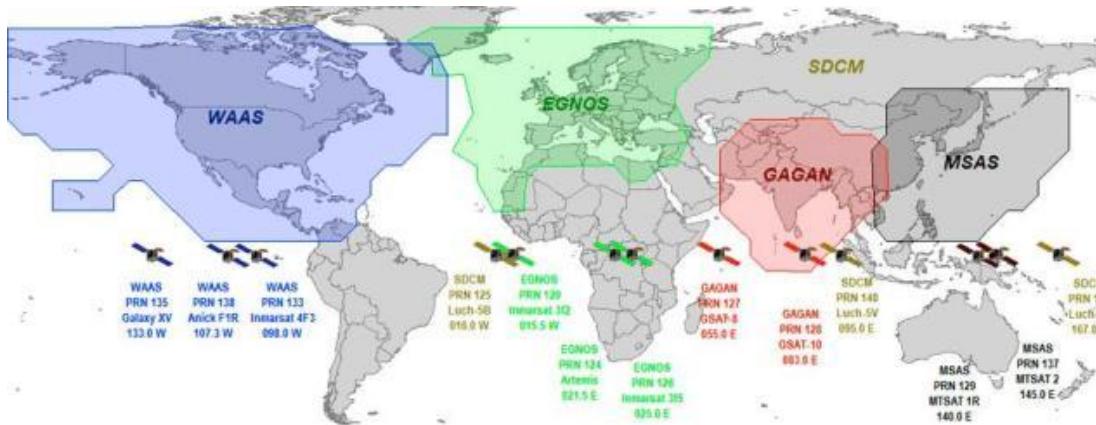


图 5 各 SBAS 系统全球分布图

上述 SBAS 系统的工作原理大致相同，都用于增强 GNSS 系统，使用户获得

更好的定位服务以及完好性信息。SBAS 包括天上的卫星星座，以及地面的参考站。卫星星座以 GEO 地球静止卫星为主，地面的参考站主要用于监测卫星测距误差。卫星测距误差包括：星历，时钟，电离层，对流层，多径和接收机噪声。获得原始定位数据（伪距、卫星播发的相位等）后，发送至中央处理设施（主控站），后者通过计算得到各卫星的各种卫星轨道、卫星时钟和电离层影响的校正参数信息，通过上行注入站发给 GEO 卫星，最后将修正信息播发给广大用户，从而达到提高定位精度的目的。SBAS 不能减轻接收机相关的误差（比如多径），SBAS 修正信息也未考虑局部对流层误差。另外，主控站生成完好性信息用来验证卫星的信号。GNSS 卫星信号以及 SBAS 运行需通过连续不断的监视，提高更高水平的完好性，任何部分的异常行为都会生成完好性信息发送给用户。通过 C 波段将差分信息和完好性信息发送卫星，卫星通过 L 波段将信息转发给用户。

通过以上分析，SBAS 系统主要从三个方面提升用户性能：第一，差分信息提高了定位精度；第二，SBAS 的 GEO 卫星提供了测距信息，提高了用户定位的可用性、连续性以及精度；第三，SBAS 完好性信息提高了安全性，GNSS 发生故障，将在 6 秒的时间内通知用户。

SBAS 增强信息主要分为：快变改正数、慢变改正数和电离层格网改正信息。快变改正数能够消除快速变化的误差（例如卫星钟差），慢变改正数能够去除误差中的低频分量，包括长期卫星钟差漂移和星历误差。电离层格网改正信息是预定义格网点的电离层垂直延迟改正数。完好性信息提供两方面的信息：所有可视卫星的可用/不可用信息、使用差分信息后剩余的卫星误差和大气误差。

SBAS 系统能为民用航空提供花费更低、可用性更高的导航功能，并将为航空领域带来巨大的经济和社会效益。首先，通过减少通信和雷达导引，降低了空管人员的工作负担，并且能为带有卫星导航接收机的军用飞机提供精密进场与着陆服务；其次，减小飞行时间和距离，可以节省燃料，降低飞行阶段的运行成本；最后，可以进一步降低机场噪声的影响，通过高精度定位，飞机可以按预定的航线重复飞行，这些预定航线可尝试规避城市和社区的上空，这样就降低了飞机飞行噪声对周边社区居民的影响。

2.2.2 WAAS

广域增强系统 WAAS 是美国从 1994 年开始研制的覆盖全美国的 GPS 增强系统，其目的是在广大范围内提高 GPS 的精度、完好性、连续性和可用性，主要为美国民用航空服务，使 GPS 达到 I 类（CAT-I）精密进近的水平。

地面段由多个广域参考站（WRS，Wide-area Reference Station）组成。这些精确测量的地面站监测和收集有关 GPS 信号的信息，然后使用地面通信网络将

其数据发送到三个广域主控站 (WMS, Wide-area Master Station), 处理和产生每颗在美国上空的卫星的完好性、差分校正量、剩余误差和电离层信息。参考站还对来自 WAAS 对地静止卫星的信号进行监测，并提供有关它们的完整性信息。由广域主站产生的信息送至地面地球站 (GES), 在那里格式化后上传至 GEO 卫星。GEO 卫星以 GPS L1 频率和类似于 C/A 码的伪码和调制方式将这些数据广播至地球表面附近的用户，以提高它们的精度、完好性、连续性和可用性。

斯坦福大学从 20 世纪 90 年代初致力于 WAAS 方面的研究。经过多年的研发和严格的认证过程, WAAS 在 2003 年获得 FAA 商业航空使用认证。WAAS 系统的设计, 是为航空用户提供米级定位精度, 实时误差在 35 米范围内, 告警时间为 6 秒。该系统自 2003 年以来一直平稳运行。截至 2007 年 10 月, 共有 38 个 WRS: 在美国本土有 20 个, 阿拉斯加 7 个, 夏威夷 1 个, 波多黎各 1 个, 墨西哥 5 个, 加拿大 4 个。通过接收 WAAS 的信息, NSTB (National Satellite Test Bed) 测试发现, 用户的定位精度可达到 0.9/1.3m (水平/高程精度)。

斯坦福大学研究了 WAAS 的理论方法和技术路线, 包括 GPS 钟差和轨道改正数的分离算法 (Tsai, 1999) 以及电离层格网算法 (Chao Y C, 1997) 等等。对于 WAAS 的主控站和参考站的数据处理方法, 技术路线图分别如下:

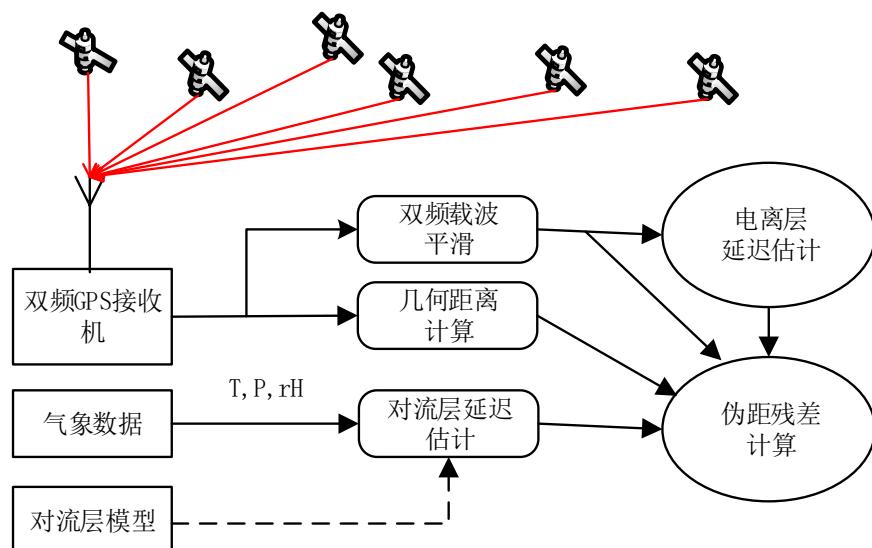


图 6 参考点数据处理流程

对于测站接收机的 GPS 双频观测数据, 使用多项式拟合法来探测相位数据周跳, 通过改进的 Hatch 滤波利用双频载波平滑伪距观测值 (Chao Y C, 1997), 降低伪距观测值的噪声。电离层延迟可通过双频无电离层组合消除; 利用气象站的实测气象数据 (气温、压强、相对湿度) 使用对流层模型计算天顶方向对流层延迟, 并通过映射函数投影到卫星测距方向上; 使用 GPS 广播星历计算卫星的轨道位置与钟差, 最后根据以上部分计算伪距残差值 (Tsai, 1999)。

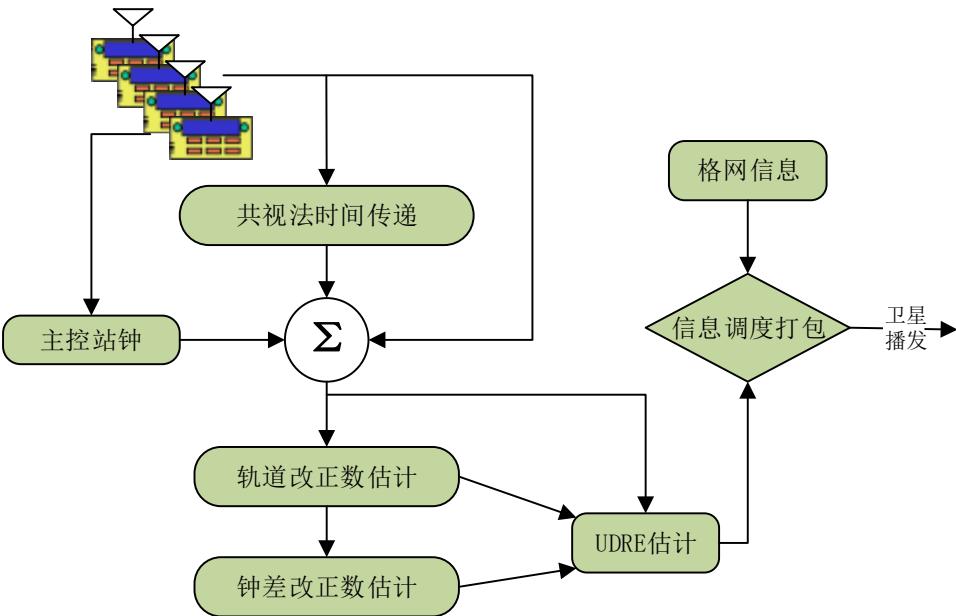


图 7 主控站数据处理流程

WAAS 主控站负责接收和处理其他参考站数据，并生成钟差改正数、轨道改正数、电离层格网等差分信息和完好性信息。

首先通过卡尔曼滤波平滑主控站站钟作为所有参考站的时间基准，并根据卫星共视法时间传递（CVTT，Common View Time Transfer）同步所有的观测值。

WAAS 在计算卫星轨道改正数和钟差改正数时，首先在两测站之间做单差处理，消除钟差改正数参数，然后利用改进的 Snapshot 算法和最小方差（MV，Minimum Variance）估计解算出卫星的轨道改正数，并用卡尔曼滤波对轨道改正数进行平滑。下一步固定卫星轨道改正数，利用监测站的非差数据解算卫星钟差改正数（Tsai, 1999）。同时根据轨道改正数、钟差改正数计算 UDRE 信息，并根据预定义的格网点计算电离层延迟量（Chao Y C, 1997）；将轨道和钟差改正数、UDRE 信息和格网信息调度打包，通过 GEO 卫星播发给差分用户使用。

其他的星基增强系统与 WASS 算法类似。另外，有相关学者对星基增强系统 WAAS 等发播的差分改正数进行精度评估，分析了美国 WAAS 和日本 MSAS 发播的差分改正数校正的准确性，发现 SBAS 的卫星轨道改正数和钟差改正数相关性较高，差分改正数的准确性取决于 SBAS 地面网络的大小和轨道轨迹（Jeong M S, 2009）。

2.2.3 EGNOS

欧洲地球静止导航覆盖服务 EGNOS 是由欧洲航天局（ESA）、欧盟（EU）和欧洲航空安全组织联合开发的基于卫星的增强系统 SBAS。它可以报告其定位

数据的可靠性和准确性，并且发送改正信息来增强 GPS, GLONASS 和伽利略卫星导航系统。

EGNOS 系统空间段由三颗地球静止轨道通信卫星组成，搭载导航增强转发器，播发导航增强信号。EGNOS 地面有大约 40 个地面站，地面站生成卫星导航系统的准确性数据并将其发送到 GEO 卫星；用户可以使用支持 EGNOS 的接收器或通过互联网从这些卫星自由获取这些数据，该系统的一个主要用途是用于航空。

EGNOS 系统已经于 2009 年开始正式运行使用，并将至少工作 20 年以上。目前，EGNOS 系统可以提供三种服务：(1) 免费的公开服务，定位精度 1m，已于 2009 年 10 月开始服务；(2) 生命安全服务，定位精度 1m，已于 2011 年 3 月开始服务；(3) EGNOS 数据访问服务，定位精度小于 1m，已于 2012 年 7 月开始服务。

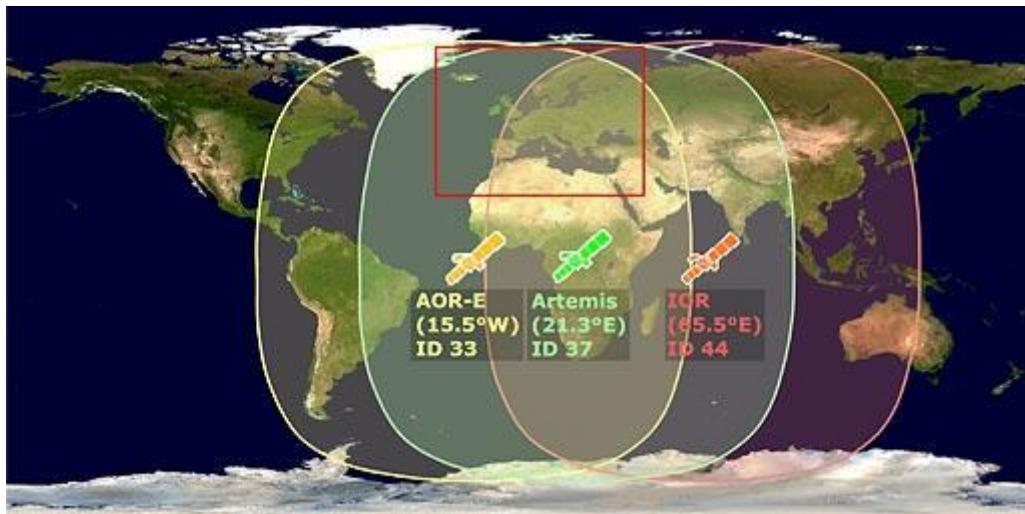


图 8 EGNOS 系统空间段覆盖

2.2.4 MSAS

MSAS 是日本的多功能 GPS 卫星星基增强系统，主要目的是为日本航空提供通信与导航服务。系统覆盖范围为日本所有飞行服务区，也可以为亚太地区的机动用户播发气象数据信息。该项目由日本气象局和日本交通部于 1996 年开始实施，合同承包商是阿尔卡特、东芝和三菱公司。

MSAS 的空间段由两颗多功能传输卫星（MTSat）组成，它们是日本发展的地球静止轨道气象和环境观测卫星—“向日葵”(Himawari)卫星的第二代。MTSat 是日本国土交通省（MLIT）和日本气象厅共同出资发展的气象观测与 GPS 系统导航增强卫星。除了为日本气象厅提供气象服务外，还为日本民航局（JCAB）执行航空运输管理和导航服务。美国劳拉空间系统公司是 MTSat-1/1R 卫星的主

承包商，日本三菱电机公司是 MTSat-2 卫星的主承包商。截至目前，在轨运行的卫星包括 MTSat-1R 和 MTSat-2，分别位于东经 140° 和 145° 上，采用 Ku 波段和 L 波段两个载波，其中 Ku 波段主要用于播发气象数据，L 波段频率与 GPS L1 频段相同，主要用于导航服务。

MSAS 系统的地地面段包括：2 个主控站分别位于神户和常陆太田，4 个地面监测站（GMS）分别位于福冈、札幌、东京和那霸，2 个监测测距站（MRS）分别位于夏威夷和澳大利亚。

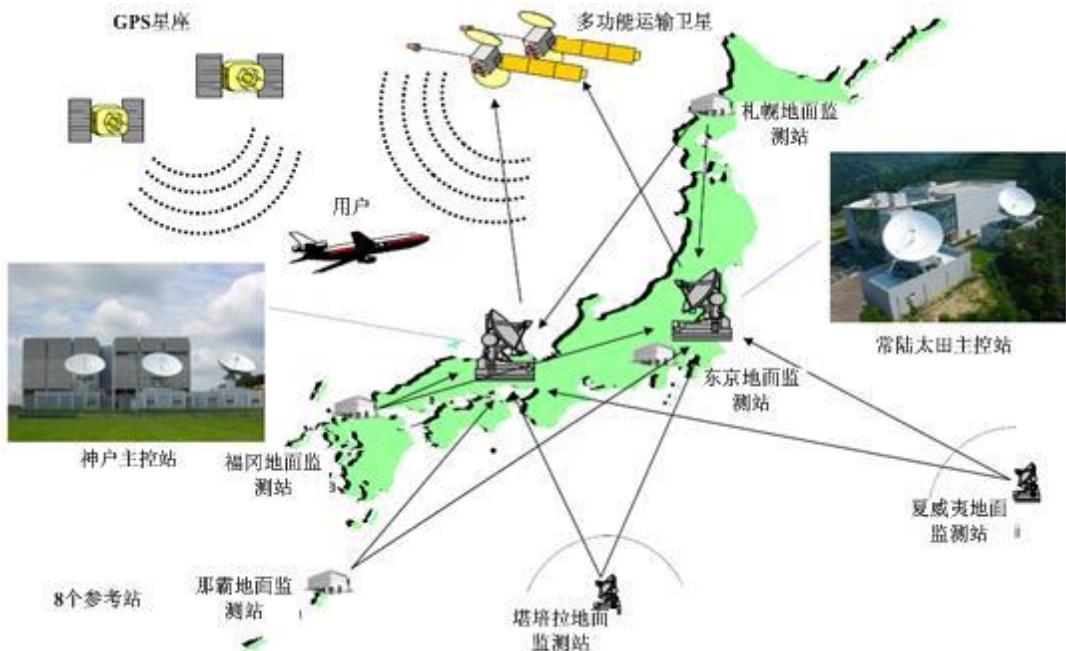


图 9 MSAS 系统构成

日本的多功能卫星星基增强系统（MSAS）已于 2007 年 9 月实现初始运行，完成了地面系统以及两颗 MTSAT 卫星的集成、卫星覆盖区域测试以及 MTSAT 卫星位置的安全评估和运行评估测试（包括卫星信号功率测试、动静态定位测试和主控站备份切换测试等）。测试表明，MSAS 能够很好地提高日本偏远岛屿机场的导航服务性能，满足国际民航组织（ICAO）对非精密近进阶段（NPA）等方面的要求。

2.2.5 GAGAN

GAGAN 是由印度空间组织（ISRO）和印度航空管理局（AAI）联合组织开发的 GPS 辅助静地轨道增强导航系统。

GAGAN 系统的空间段由三颗位于印度洋上空的 GEO 卫星构成，采用 C 波段和 L 波段，其中 C 波段主要用于测控，L 波段与 GPS 的 L1（1575.42MHz）

和 L5 (1176.45MHz) 频率完全相同，用于播发导航信息，并可与 GPS 兼容和互操作。空间信号覆盖整个印度大陆，能为用户提供 GPS 信号和差分修正信息，用于改善印度机场和航空应用的 GPS 定位精度和可靠性。

按计划，GAGAN 空间段的三颗 GEO 卫星分别为“地球静止卫星”(Geosynchronous Satellite, GSAT) 系列的 GSAT-8、GSAT-10 以及 GSAT-15。“地球静止卫星”是印度自主发展的静止轨道通信卫星系列，是印度国家卫星系统两大系列之一，由印度空间研究组织研制，并计划采用印度自己的“地球同步卫星运载火箭”(GSLV) 发射。目前，GAGAN 系统空间段计划使用的三颗 GEO 卫星已经发射了两颗：第一颗搭载 GAGAN 载荷的卫星 GSAT-8 于 2011 年 5 月发射，目前正工作在东经 55° 的轨道上；第二颗搭载 GAGAN 载荷的卫星 GSAT-10 于 2012 年 9 月 28 日发射，目前正工作在东经 83 度的轨道上；最后一颗 GSAT-15 计划于 2014 年发射。

GAGAN 系统的地面段包括：1 个位于班加罗尔的主控站、8 个分别位于德里、班加罗尔、艾哈迈达巴德、加尔各答、查谟、布莱尔港、古瓦哈蒂、特里凡得琅的地面参考站以及 1 个上行链路站组成，由印度空间研究组织的数字化通信系统将各子系统整合在一起。

2.2.6 SDCM

自 2002 年起，俄罗斯联邦就开始着手研发建立 GLONASS 系统的卫星导航增强系统——差分校正和监测系统 (SDCM)。SDCM 将为 GLONASS 以及其他全球卫星导航系统提供性能强化，以满足所需的高精确度及可靠性。和其他的卫星导航增强系统类似，SDCM 也利用了差分定位的原理，该系统主要由 3 部分组成：差分校准和监测站、中央处理设施以及用来中继差分校正信息的地球静止卫星。

俄罗斯的 SDCM 增强系统的空间段由三颗 GEO 卫星——“射线”(Luch 或 Loutch) 卫星组成，分别为 Luch-5A、Luch-5B 和 Luch-4。“射线”卫星是苏联/俄罗斯民用数据中继卫星系列，主要为苏联/俄罗斯和平号 (Mir) 空间站、暴风雪号 (Buran) 航天飞机、联盟号 (Soyuz) 飞船等载人航天器以及其他卫星提供数据中继业务，另外也用于卫星固定通信业务。同时，作为 SDCM 的空间部分，这三颗卫星上搭载了 SDCM 信号转发器，可将 SDCM 信号从中央处理设施转发给各用户。第一颗卫星“Luch-5A”，于 2011 年发射到西经 16° 的轨道位置。第二颗卫星“Luch-5B”，于 2012 年发射到东经 95° 的轨道位置。到了 2014 年，随着第三颗卫星“Luch-4”发射到东经 167° 轨道位置，SDCM 的空间段将部署完成。

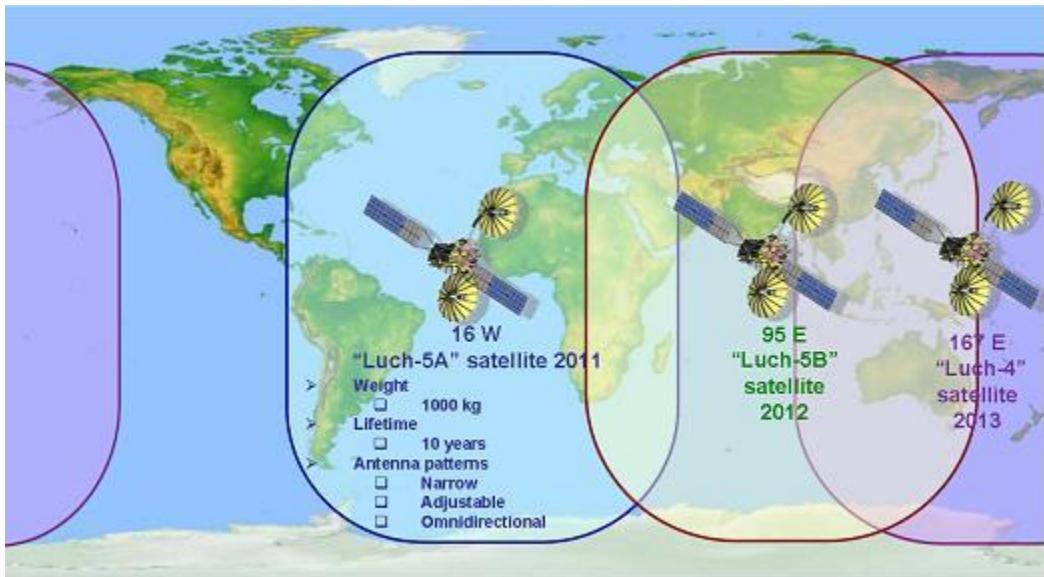


图 10 SDCM 系统空间段覆盖

近几年，俄罗斯政府一直大力建设 SDCM 系统的地面差分校准和监测站，见表 1。截止到 2012 年末，俄罗斯政府已经建立差分站 24 个，其中在俄罗斯境内建成了 19 个差分站，在俄罗斯境外建成了 5 个差分站。在境外的 5 个差分站中，其中有南极洲的 3 个站，并还在计划建立第 4 个站。

根据 2012 年 ICG 大会上俄罗斯透露的消息，未来俄罗斯政府还将建立 39 个差分站，其中将包括俄境内的 21 个站以及俄境外的 18 个站，其中将包括我国的长春和昆明。

2.2.7 北斗广域差分增强系统

WAAS 等其他星基增强系统是独立于卫星导航系统本身，由其他运营机构进行维护。我国于 2006 年开始建设北斗二代导航系统，与其他 GNSS 系统不同，北斗卫星导航系统在系统设计时就融合考虑了基本服务与广域差分的一体化，统一建设北斗区域卫星导航系统和北斗星基增强系统，给用户提供开放以及授权服务。其中，开放服务为用户免费提供基本导航信息，而授权服务为授权用户提供差分和完好性等信息以提高其服务性能。北斗广域差分增强系统在基本导航参数的基础上，利用服务区域内均匀分布的地面监测站数据，计算差分改正数并通过 GEO 卫星向用户进行广播。北斗星基增强系统采用的监测站与北斗区域监测网一致。

北斗一期增强系统结合了我国北斗区域卫星导航系统的实际特点，提出了一维的等效钟差模型。目前北斗广域差分增强系统播发的参数包括等效钟差改正数以及服务单频授权用户的电离层格网模型。其中，等效钟差的处理利用了 CNMC

(Code Noise and Multipath Correction) 平滑后的伪距观测数据，其包含了卫星轨道的径向误差的改正以及卫星钟差的改正。等效钟差的精度受到伪距残余噪声的限制，并且无法包含卫星轨道误差切向和法向分量的影响。为尽量降低伪距观测值噪声的影响，需要采用相位观测数据。而相位观测数据的引入涉及到复杂的模糊度参数计算。相位历元间差分能够消除模糊度参数，Bock H (2003) 和陈俊平 (2007) 采用该方法进行低轨卫星的后处理精密定轨；Ge 等人 (2012) 采用相位历元间差分实时估计卫星钟差历元间变化及其累加值，同时利用伪距估计钟差的初始偏差，并将该初始偏差加到历元间差分累加值上获取卫星钟差。基于非差伪距数据和相位历元间差分综合的基本思想，本文建立了钟差改正和轨道改正统一处理的广域差分新模型。该模型利用了高精度相位观测值，并新增了轨道改正数。

考虑到现有的用户接收机在不进行协议改造的情况下，只能使用钟差改正数，无法使用轨道改正数。为不影响现有用户的使用，在利用新模型进行广域差分数据处理时，对轨道改正数径向分量进行约束为 0，从而得到的轨道改正数包含了轨道误差在轨道切向和法向的改正，其表示在地固坐标系下为包含 3 维分量的改正数。同时，钟差改正数任然包含了轨道改正数的径向分量，与现有等效钟差一致（陈俊平，2017）。

3 坐标框架和时间系统

在卫星导航观测技术中,卫星导航的本质是精确时间的测量(杨赛男,2014)。精准的坐标框架和时间系统是高精度数据处理的基础,所描述的物体位置以及时刻必须基于同一个基准,卫星导航定位中,卫星观测距离以依赖卫星信号传播时间的准确量测,北斗卫星、接收机位置的描述与准确估计离不开坐标、时间系统。同样,坐标、时间系统也是广域差分星基增强理论的基础,基于此,本章简要介绍论文中使用、涉及到的时间系统和坐标系统以及各系统之间的转换关系(李济生,1995)。

3.1 时间系统

时间系统应有其尺度(时间单位)与原点(历元),只有把尺度与原点结合起来,才能给出时刻的概念。理论上,任何一个周期运动,只要它的运动是连续的,其周期是恒定的,并且是可观测和用实验复现的,都可以作为时间尺度(单位)。实际上,随着观测技术的发展和更加稳定的周期运动的发现,将不断接近这一理论要求。实际应用中,由于所选用的周期运动现象不同,便产生了不同的时间系统。

在星基增强数据处理中,时间是独立变量,但是在计算不同的物理量时却使用不同的时间系统。例如,在计算固体潮误差时,涉及到太阳、月球的坐标的计算,须使用动力学时;而输入的观测量的时间为UTC等等。

论文中涉及的时间系统主要与3种运动周期有关,分别为太阳的公转周期、地球的自转周期以及原子的跃迁周期,以下详细介绍了本论文涉及到的相关时间系统的定义以及时间系统之间的转换。

3.1.1 时间系统的定义

恒星时

春分点在当地上中天的时刻为当地恒星时的0点,春分点在当地的时角定义为当地恒星时。春分点的位移速率是受岁差、章动影响的,当考虑岁差和章动的影响时得到的恒星时为真恒星时,当消除章动影响后得到的恒星时称为平恒星时。

太阳时

太阳时分为真太阳时和平太阳时。真太阳时定义为:取太阳视圆面中心上中

天的时刻为 0 点，太阳视圆面中心的时角即为当地的真太阳时。由于真太阳时变化不均匀，因此定义了平太阳时：假定在赤道上一个作等速运动的点，其运行速度等于太阳视运动的平均速度，并同时经过春分点，称假想点为平太阳。平太阳时=平太阳的时角+12 小时。

世界时

格林尼治的平太阳时称为太阳时。由于平太阳时是个假想点，是观测不到的。因此，世界时实际上是通过观测恒星的周日运动，以恒星时为媒介得到的。世界时是地球自转的反映。根据对世界时采用不同的修正，又定义了 3 种不同夫人世界时：

UT0：通过测量恒星只记得到的世界时称为 UT0。

UT1：由于极移的影响，各地的子午线在变化。所以 UT0 与观测站的位置有关。经过极移修正之后，得到 UT1。

$UT1 = UT0 + \text{极移修正}$

UT2：由于地球自转存在长期、周期和不规则变化，所以 UT1 也呈现上述变化。将周期性季节变化修正后，就得到 UT2。

$UT2 = UT1 - \text{周期变化项}$

原子时

主要的原子时系统有：

A1：美国海军天文台建立的原子时。取 1958 年 1 月 1 日 0 时 (UT2) 为 A1 的起点，铯原子 133 原子基态的两个超精密结构能态跃迁辐射震荡 9192631770 次为 A1 的秒长度。

TAI：由国际时间局 (BIH) 确定的原子时系统。定义同 A1，只是起始历元比 A1 早 34 毫秒。

协调世界时

由世界时和原子时的定义可以看出：世界时可以很好地反映地球自转，但其变化是不均匀的，原子时的变化均匀，但其定义与地球自转无关。因此，建立协调世界时 UTC，协调世界时的历元与时间时的历元相同，其秒长的定义与原子时秒长定义相同。为了使协调时间时更接近于世界时，当 $|UTC - UT1|$ 超过 0.9 秒时在年初或年终强迫跳秒。每跳 1 次为 1 秒，称闰秒。因此 UTC 不是一个连续的时间系统。

地球动力学时

地球动力学时 (TDT) 是地心参考框架下的动力学时，用于解算相对于地心惯性系的动力学问题，取代过去的历书时。它与国际原子时相差了 32.184 秒，单位与原子时相同。它是连续且均匀的时间系统，是卫星运动方程的时间引数。

北斗时

北斗区域卫星导航系统同样定义了自己的时间系统，简称 BDT (BeiDou Time)。以 2006 年 1 月 1 日零时零分零秒的 UTC 时间作为时间原点，使用原子时的秒长基准。BDT 同样不受跳秒影响，与 TAI 相差为常数，目前与 UTC 之差为 2 秒。北斗区域卫星导航系统时标采用周和周内秒的形式表示，2006 年 1 月 1 日 0 时为 0 周 0 秒。

3.1.2 时间系统之间的转换

由地球自转确定的时间（如，平太阳时加上极移改正得到的 UT1 和真恒星时 Θ_0 ）之间的关系为：

$$\Theta_0 = 1.002737909 \text{UT1} + \vartheta_0 + \Delta\psi \cos \varepsilon \quad (3-1)$$

上式右边的第一项反应太阳时和恒星时的尺度差异， ϑ_0 是格林尼治子夜（即，世界时 0^h ）实际的恒星时，第三个项考虑了章动的影响是 $\Delta\psi$ 在赤道面上的投影，不计章动项时，由 (3-1) 式计算得到的是平恒星时。 ϑ_0 的时间级数公式为：

$$\vartheta_0 = 24110.54841^s + 8640184812866^s T_0 + 0.093140^s T_0^2 - 6.2^s \cdot 10^{-6} \cdot T_0^3 \quad (3-2)$$

式中： T_0 表示从 J2000.0 至观测历年当天世界时 0^h 的儒略世纪数，儒略世纪数为 26525 个平太阳日。

UTC 加上 dUT1 得到 UT1，dUT1 随时间变化，由 IERS 发布：

$$\text{UT1} = \text{UTC} + \text{dUT1} \quad (3-3)$$

当 dUT1 的绝对值大于 0.9^s 时，在 UTC 中加入跳秒。

原子时与动力学时之间的转换关系式为：

$$\begin{aligned} \text{TAI} &= \text{TDT} - 32.184^s, \text{ 常数偏差} \\ \text{TAI} &= \text{UTC} + 1.00^s n, \text{ } n \text{ 为跳秒数} \end{aligned} \quad (3-4)$$

整数跳秒数 n 由 IERS 发布，例如，在 2007 年 1 月， $n = 33$ 。

3.2 坐标系统

在星基增强数据处理中，为了方便描述不同物体位置，所使用的的坐标系统是不一样的。例如，地面接收机与地球自转固联在一起，使用地固坐标系描述接收机的位置比较方便；海潮改正中涉及到太阳、月球的位置，需在惯性系中使用JPL的星历历表计算得到；卫星天线相位中心误差需在星固坐标系中计算，再换算到地固坐标系中等等。

坐标系是由坐标原点、基本平面和基本平面中的主方向（在直角坐标系中通常是X轴的方向）三要素定义的。本节介绍了本论文将用到的坐标系统的定义以及坐标系统之间的转换。

3.2.1 各坐标系的定义

协议惯性坐标系

地心惯性坐标系以地球质心为原点，与地球自转无关。太阳、月亮等天体运动的位置也与地球自转无关，使用惯性坐标系较为方便描述卫星的位置。在卫星导航中，使用的惯性参考系一般为J2000.0坐标系，它的坐标原点在地球质心，参考平面是J2000.0平赤道面，Z轴向北指向平赤道面北极，X轴指向J2000.0平春分点，Y轴与X和Z轴组成直角右手系。

协议地球坐标系

由于惯性坐标系与地球自转无关，地球上任一固定点在惯性系中的坐标将随地球自转而变化，在导航定位的实际应用中很不方便。为描述地面观测站的位置，有必要建立与地球体相固联的坐标系统，即地球坐标系（有时也称地固坐标系）。协议地球坐标系通常原点在地球质心，正Z轴指向协议的平均地极（协议地球极CTP），正X轴指向赤道上的经度零点（格林尼治平均天文台），Y轴与Z轴和x轴构成右手坐标系。WGS-84、ITRF、CGCS2000坐标框架都属于协议地球坐标系。地面测站位置与广播电文计算的卫星位置一般都以协议地球坐标系表示。

北斗系统采用2000中国大地坐标系（CGCS2000）。CGCS2000大地坐标系的定义如下：原点位于地球质心；Z轴指向国际地球自转服务组织（IERS）定义的参考极（IRP）方向；X轴为IERS定义的参考子午面（IRM）与通过原点且同Z轴正交的赤道面的交线；Y轴与Z、X轴构成右手直角坐标系。

CGCS2000原点也用作CGCS2000椭球的几何中心，Z轴用作该旋转椭球的旋转轴。CGCS2000参考椭球定义的基本常数为：

长半轴:	$a=6378137.0\text{m}$
地球（包含大气层）引力常数:	$\mu=3.986004418\times10^{14}\text{m}^3/\text{s}^2$
扁率:	$f=1/298.257222101$
地球自转角速度:	$\dot{\Omega}_e=7.2921150\times10^{-5}\text{rad/s}$

测站坐标系

坐标原点为测站中心，即测量设备跟踪天线的旋转中心。站心当地地平面为基本平面，由站心指向正北方向。对于测站直角坐标系，X 轴在基本平面内指向东方，Y 轴指向主方向，Z 轴与基本平面垂直指向上方。

星固坐标系

星固坐标系便于描述卫星天线的方位位置。星固坐标系原点为卫星质心，Z 轴由卫星质心指向地心，Y 轴指向轨道面的负法向，X 轴在轨道面内与 Z 轴垂直指向卫星运动方向，Y 轴实质为太阳至卫星方向与卫星至地心方向的叉乘方向。X、Y、Z 轴成右手系。

轨道坐标系

卫星轨道坐标系又称 RTN 坐标系，与星固系的定义类似，只是坐标轴指向不同，其坐标原点为卫星质心，R 轴为径向，与地心到卫星质心的向径方向一致。T 轴为横向，在轨道面内与 R 轴垂直，指向卫星运动方向。N 轴为轨道面正法向，与 R、T 轴成右手系。

3.2.2 坐标系的转换

同一位置的物体在不同坐标系中的坐标是不同的，因此需要不同坐标系之间的相互转换。

地固系与惯性系之间的转换关系如下：

$$X_{TRS} = R^M R^S R^N R^P X_{CRS} \quad (3-5)$$

X_{CRS} 表示 J2000.0 惯性系下的坐标， X_{TRS} 代表地固坐标系的坐标， R^P 代表岁差旋转矩阵， R^N 代表章动旋转矩阵， R^S 表示地球自转旋转矩阵，旋转角度为格林尼治真恒星时， R^M 表示极移旋转矩阵。

另外，星固系与地心惯性坐标系转换关系如下：

$$X_{SRS} = C_{3\times 3} X_{CRS} \quad (3-6)$$

$$\begin{aligned}
 C(3,i) &= -\frac{\vec{r}}{r} \\
 C(2,i) &= -\frac{(\vec{r}_{sun} - \vec{r}) \times \vec{r}}{|(\vec{r}_{sun} - \vec{r}) \times \vec{r}|} \\
 C(1,i) &= C(2,j) \times C(3,k)
 \end{aligned} \tag{3-7}$$

其中， $i=1,2,3$ 对应于转换矩阵 C 中每个行向量的三个分量， $C(2,j)$ 和 $C(3,k)$ 为矩阵 C 中的第 2 行和第 3 行的行向量。 \vec{r} 表示地心到卫星质心的矢量 (CRS)， \vec{r}_{sun} 表示地心到太阳质心的矢量 (CRS)。

卫星轨道坐标系与地心惯性坐标系转换关系如下：

$$X_{RTN} = G_{3 \times 3} X_{CRS} \tag{3-8}$$

$$\begin{aligned}
 G(1,i) &= -\frac{\vec{r}}{r} \\
 G(3,i) &= -\frac{\vec{r} \times \dot{\vec{r}}}{|\vec{r} \times \dot{\vec{r}}|} \\
 G(2,i) &= G(1,j) \times G(3,k)
 \end{aligned} \tag{3-9}$$

其中， $i=1,2,3$ 对应于转换矩阵 G 中每个行向量的三个分量， $G(1,j)$ 和 $G(3,k)$ 为矩阵 G 中的第 1 行和第 3 行的行向量。 \vec{r} 表示地心到卫星质心的矢量 (CRS)， $\dot{\vec{r}}$ 表示卫星运动的速度矢量 (CRS)。

4 星基增强理论与数据处理方法

在卫星导航定位中，用户的定位精度在统计意义上，可以大致表示为用户等效距离误差 UERE (User Equivalent Range Error) 与精度因子 DOP (Dilution of Precision) 的乘积 (Misra, 2011)。

$$Pos_{error} = UERE \times DOP \quad (4-1)$$

其中 DOP 值反映了观测历元空中可视卫星的几何分布，UERE 包含伪距的所有测量误差以及修正模型误差，可以分为空间信号的用户距离误差 URE (User Range Error) 和用户设备误差 UEE (User Equipment Error)。UEE 包含所有与接收机有关的误差 (eg. 噪声、多径效应、未修正的大气延迟)，而 SISRE 主要指与卫星轨道和星钟有关的误差，受空间卫星的特性 (星钟稳定性、轨道运动的可预报性) 和监测站的分布的影响。

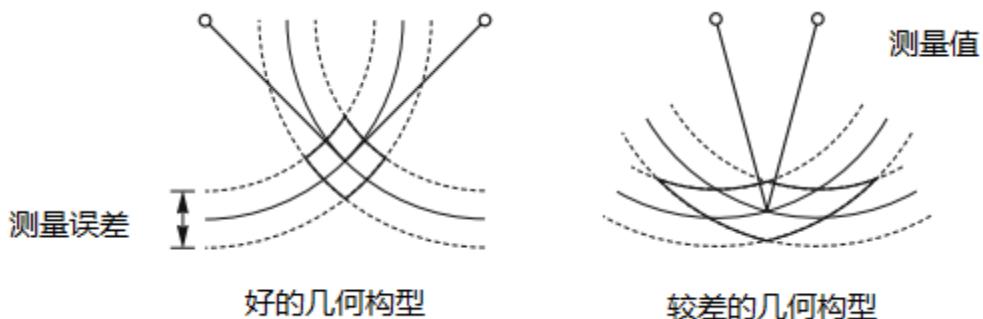


图 11 定位误差与几何构型和测量误差之间的关系

一旦卫星星座完成建设后，地面测站的 DOP 值已经基本确定，因此为了提高用户导航定位的精度，只能提高空间信号的精度。通过北斗星基增强系统计算卫星的差分改正数播发给用户使用，可达到提高空间信号精度的目的。

北斗星基增强系统的原理，主要利用地面已知精确坐标的监测站的实时观测数据，对各种误差源进行分类，计算出轨道改正数、钟差改正数以及电离层格网改正信息，通过 GEO 卫星将改正数拨发给用户使用。本章主要介绍星基增强理论与处理方法，从观测模型、误差修正、预处理、模型处理以及格网电离层等方面详细说明。

4.1 观测值

在概念上，卫星导航观测值是基于接收信号与接收机产生的信号之间的比较，

是从测量的时间或相位差推导出的距离值。与地面上直接的距离测量不同，卫星导航钟涉及两个时钟的“单向概念”，一个钟为卫星钟，另一个钟为接收机钟。由于此观测值包含卫星钟、接收机钟的误差以及信号传播过程中的延迟，因此被称为伪距。

在本论文星基增强系统的数据处理中，综合使用了伪距和相位观测值，任意测站对一颗卫星 sat 的伪距、相位观测方程可表示为：

$$\begin{aligned} P_i &= \rho(x^{sat}) + c \cdot (\tau_{rec} - \tau^{sat}) + \Delta corr_{code} + \varsigma \\ L_i &= \rho(x^{sat}) + c \cdot (d\tau_{rec} - d\tau^{sat}) + N\lambda_i + \Delta corr_{phs} + \varepsilon \end{aligned} \quad (4-2)$$

式中， P_i, L_i 分别伪距、相位观测值； ρ 为卫星与测站之间的理论距离，受由广播星历计算的卫星轨道 x^{sat} 误差的影响； i 为频点标识； τ_{rec}, τ^{sat} 分别表示测站和卫星钟差，卫星钟差由广播电文中的星钟参数计算而来，包含误差； $\Delta corr_{code}$ 表示伪距在传播过程中的各种延迟，包括测站和卫星伪距的硬件延迟、相对论延迟、卫星天线相位中心改正、电离层延迟、对流层延迟、地球自转效应、地球固体潮改正、地球大洋负荷改正、接收机天线相位中心改正； ς 为包含多路径误差等的噪声； N 为模糊度参数， λ_i 为相位波长； $\Delta corr_{phs}$ 表示相位在传播过程中的各种延迟， $\Delta corr_{phs}$ 与 $\Delta corr_{code}$ 的误差项大致相同，包含相对论延迟、卫星天线相位中心改正、电离层延迟、对流层延迟、地球自转效应、地球固体潮改正、地球大洋负荷改正、接收机天线相位中心改正； ε 为相位观测值的噪声。

4.2 误差改正

在伪距和相位观测模型中都有一些误差，主要分为 3 类：与卫星有关的误差（广播星历误差、广播星钟误差、相对论效应、卫星天线相位中心偏差等）与信号传播有关的误差（电离层误差、对流层误差、伪距码多路径效应等）以及与接收机有关的误差（接收机钟差、地球自转改正、地球固体潮改正、地球大洋负荷改正、接收机天线相位中心偏差、伪距码观测噪声、载波观测噪声等）。以下对这些误差改正进行说明。

4.2.1 广播星历和星钟误差

GNSS 卫星发射的导航电文 (Navigation Messages) 包含了广播星历 (BCE, Broadcast Ephemeris)、卫星健康状态、电离层延迟修正参数等等。其中，广播星历是为 SPS (Standard Positioning Service) 用户提供实时的卫星轨道和时钟信息，分别由卫星轨道参数和卫星钟的修正参数计算得到，北斗系统中卫星轨道和钟差

的算法如下：

1、计算卫星运动的平均角速度 n

首先计算参考时刻 t_{oe} 的平均角速度 n_0

$$n_0 = \sqrt{GM} / (\sqrt{A})^3 \quad (4-3)$$

式中 $\sqrt{GM} = 3.986004418 \times 10^{14} m^3 / s^2$, 为 CGCS2000 坐标系下的地球引力常数, \sqrt{A} 由广播星历给出, 为卫星轨道长半轴的平方根, 然后根据广播星历中给出的摄动参数 Δn 计算观测时刻卫星的平均角速度 n :

$$n = n_0 + \Delta n \quad (4-4)$$

2、计算观测瞬间卫星的平近点角 M

$$M = M_0 + n(t - t_{oe}) \quad (4-5)$$

其中, M_0 由广播星历给出, 是参考时刻 t_{oe} 的平近点角, 广播星历也给出了参考时刻 t_{oe} 。

3、计算卫星的偏近点角 E

$$E = M + e \sin E \quad (4-6)$$

式中, e 是卫星轨道的偏心率, 由广播星历给出, 解上述方程可用迭代法或微分改正法。

4、计算真近点角 f

$$\begin{cases} \cos f = \frac{\cos E - e}{1 - e \cos E} \\ \sin f = \frac{\sqrt{1 - e^2} \sin E}{1 - e \cos E} \\ f = \arctan \frac{\sqrt{1 - e^2} \sin E}{\cos E - e} \end{cases} \quad (4-7)$$

5、计算升交距角 u'

$$u' = \omega + f \quad (4-8)$$

式中, ω 是近地点角距, 由广播星历给出。

6、计算摄动改正项 u, r, i

$$\begin{cases} \delta_u = C_{uc} \cos 2u' + C_{us} \sin 2u' \\ \delta_r = C_{rc} \cos 2u' + C_{rs} \sin 2u' \\ \delta_i = C_{ic} \cos 2u' + C_{is} \sin 2u' \end{cases} \quad (4-9)$$

$$\begin{cases} u = u' + \delta_u \\ r = r' + \delta_r = a(1 - e \cos E) + \delta_r \\ i = i_0 + \delta_i + IDOT(t - t_{oe}) \end{cases} \quad (4-10)$$

式中, 广播星历给出了 6 个摄动参数 C_{uc} 、 C_{us} 、 C_{rc} 、 C_{rs} 、 C_{ic} 、 C_{is} ; $a = (\sqrt{A})^2$, \sqrt{A} 由广播星历给出; i_0 为 t_{oe} 时刻的轨道倾角, 由广播星历中的开普勒六参数给出, $IDOT$ 为轨道倾角 i 的变化率, 由广播星历中的摄动九参数给出。

7、计算卫星在轨道面坐标系中的位置

在轨道平面直角坐标系中(坐标原点位于地心, X 轴指向升交点)卫星的平面直角坐标为:

$$\begin{cases} x = r \cos u \\ y = r \sin u \end{cases} \quad (4-11)$$

8、计算历元升交点的赤经(地固系)和 MEO/IGSO 卫星在 CGCS2000 坐标系中的坐标

$$\Omega = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \omega_e) \cdot (t - t_{oe}) - \omega_e t_{oe} \quad (4-12)$$

$$\begin{cases} X = x \cos \Omega - y \cos i \sin \Omega \\ Y = x \sin \Omega + y \cos i \cos \Omega \\ Z = y \sin i \end{cases} \quad (4-13)$$

式中, Ω_0 是参考时刻 t_{oe} 计算的升交点赤经, $\dot{\Omega}$ 是升交点赤经变化率, 由广播星历给出; $\omega_e = 7.2921150 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$, 为 CGCS2000 坐标系下的地球旋转速率;

9、计算历元升交点的赤经(惯性系)和 GEO 卫星在 CGCS2000 坐标系中的坐标

$$\Omega = \Omega_0 + \dot{\Omega}(t - t_{oe}) - \omega_e t_{oe} \quad (4-14)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_z(\omega_e t_k) R_x(-5^\circ) \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (4-15)$$

$$\begin{cases} X = x \cos \Omega - y \cos i \sin \Omega \\ Y = x \sin \Omega + y \cos i \cos \Omega \\ Z = y \sin i \end{cases} \quad (4-16)$$

其中, $t_k = t - t_{oe}$, $\begin{cases} X' = x \cos \Omega - y \cos i \sin \Omega \\ Y' = x \sin \Omega + y \cos i \cos \Omega, \\ Z' = y \sin i \end{cases}$

$$R_z(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad R_x(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

10、计算卫星钟差 τ^{sat}

$$\tau^{sat} = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2 \quad (4-17)$$

式中, t_{oc} 为钟差参数参考时刻, a_0 、 a_1 、 a_2 为钟差参数, 由导航电文给出。

需要注意的是, 北斗的广播星历的星历参数是主控站利用区域监测网的观测数据进行精密定轨, 并根据精密定轨的结果外推预报出卫星轨道值, 将很多个历元的轨道拟合出 16 个星历参数播发给用户使用, 星历参数计算的卫星轨道存在预报误差以及拟合误差。另外, 北斗区域卫星导航系统采用独立的时间同步体系向用户提供导航电文中的卫星钟差信息, 时间同步天线设备时延一般通过事先标校获得, 残余的标校误差包含在发播给用户的钟差参数中, 也影响卫星钟差的预报精度。

选取 2013 年 4 月 25 日的北斗广播星历计算广播星历轨道和钟差, 与精密星历轨道、钟差进行比较, 7 号卫星的结果如图 2 所示。可看到 7 号卫星的空间信号轨道误差在 1m 以内, T 和 N 方向的误差较大, 钟差预报误差大部分在 1m 以内。在一天之中, 空间信号误差 R、T、N 方向变化出现周期规律。广播星历更新后, 各轨道误差分量尤其是 T、N 方向会发生较大的跳变。另外, 径向精度优于切向和法向, 这是由于地面站跟踪北斗卫星时, 观测值对径向的变化相对其他两个方向更为敏感, 且切向和法向的力模型不够完善。R、T、N 方向的轨道误差大致呈现 12h 的周期, 这与卫星的运行周期和轨道力学模型误差相关(杨赛男, 2015)。

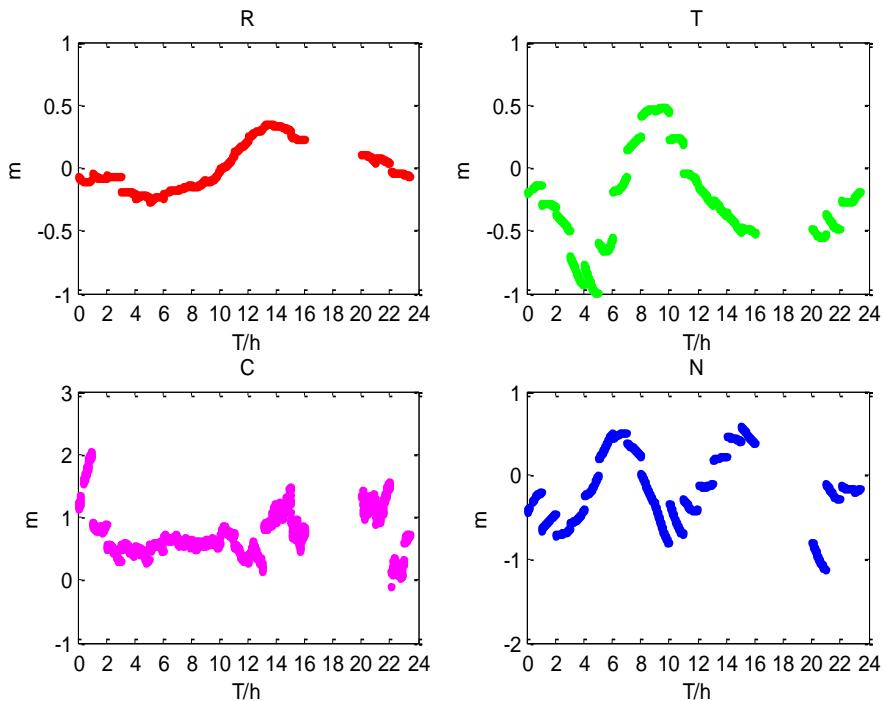


图 12 BDS C07 卫星空间信号误差 SISE 各分量分布示意图

广播星历的轨道误差和星钟正是本文重点研究的对象，星基增强系统实时解算钟差改正数和轨道改正数，以较高的频率将差分改正数播发给用户使用，实时修正钟差误差和轨道误差，提高 SISRE 的精度，从而提高用户的导航定位精度。

4.2.2 相对论改正

卫星导航测量中的相对论效应是由卫星钟和接收机钟在惯性空间中的运动速度不同以及这两台钟所处位置的地球引力位的不同而引起的。由于两台钟在地心惯性参考系中的速度不同，需要狭义相对论校正；而两台钟的地球引力位不同需要广义相对论校正。为了补偿这两种影响，卫星时钟在发射前做过微小的调整，无需用户另作改正。但是用户必须对由于卫星轨道的轻微偏心引起的另一个相对论周期效应进行修正，修正公式为：

$$\Delta t_r = F \cdot e \cdot \sqrt{A} \cdot \sin E \quad (4-18)$$

其中， e 为卫星轨道偏心率， \sqrt{A} 为卫星轨道长半轴的开方，由卫星星历参数提供， E 为卫星轨道偏近点角，在 4.2.1 中有计算说明， $F = -2\mu^{1/2} / c^2$ ， $\mu = 3.986004418 \times 10^{14} m^3 / s^2$ 为地球引力常数， $c = 2.99792458 \times 10^8 m / s$ 为光速。

4.2.3 卫星天线相位中心改正

卫星质量中心与卫星发射天线的相位中心一般不重合，这两者之间的偏差称为卫星天线相位中心偏差（李征航，2005；李晓波，2013）。

卫星姿态描述了卫星本体坐标系与卫星轨道坐标系之间的关系。定义卫星质心为原点，卫星运动方向为 X 轴，轨道面法向为 Y 轴，Z 轴正交于 XOY 平面。绕 X 轴旋转的姿态角为滚动角，绕 Y 轴旋转为俯仰角，绕 Z 轴旋转为偏航角。北斗卫星导航系统对各类型卫星采用了各不相同的卫星姿态控制模式，对 GEO 卫星采用了零偏航模式（orbit-normal），即 Z 轴指向地心，Y 轴正交于卫星位置-速度平面，X 轴与 Y/Z 轴正交。对 IGSO/MEO 卫星采用了动偏航模式（yaw-steering），即 Z 轴指向地心，Y 轴正交于太阳-地心-卫星平面，X 轴与 Y/Z 轴正交。不同的姿态模式使得精密定轨处理过程中需针对不同类型卫星采用不同的卫星天线相位中心改正模型。区域卫星导航系统对各卫星姿态进行了实时监测，我们将姿态偏航角监测值与理论计算值进行比较，可得到名义姿态预报精度。

由于不同卫星姿态控制策略不同，卫星相位中心改正模型应采用相适应的改正模型。GEO 卫星姿态控制采用 Orbit-Normal(ON) 模型，即 Z 轴指向地心，Y 轴是 Z 轴与卫星速度方向叉乘方向，X 轴与 Y、Z 呈右手系。IGSO/MEO 卫星姿

态控制采用 Yaw-Steering(YS)模型，即 Z 轴指向地心，Y 轴是 Z 轴与卫星至太阳方向叉乘方向，X 轴与 Y、Z 呈右手系。

根据不同姿态控制模式分别对 GEO 和 IGSO/MEO 卫星进行相位中心修正：

(1) IGSO/MEO 卫星天线相位中心改正模型：

$$\bar{e}_z = -\frac{\bar{r}}{|\bar{r}|}, \bar{e}_y = \bar{e}_z \times \frac{\bar{r}_{sun} - \bar{r}}{|\bar{r}_{sun} - \bar{r}|}, \bar{e}_x = \bar{e}_y \times \bar{e}_z \quad (4-19)$$

其中 \bar{r} 、 \bar{r}_{sun} 为惯性系中卫星位置向量和太阳位置向量。

相位中心改正模型为：

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R_{ciscts} \cdot (\bar{e}_x \quad \bar{e}_y \quad \bar{e}_z) \cdot \begin{pmatrix} x_{phs} \\ y_{phs} \\ z_{phs} \end{pmatrix}, \quad d\rho_{phs} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}^T \cdot \frac{\bar{r}_{sta} - \bar{r}}{|\bar{r}_{sta} - \bar{r}|} \quad (4-20)$$

其中 R_{ciscts} 为惯性系与地固系转换旋转矩阵， \bar{r}_{sta} 为测站在地固系位置， $d\rho_{phs}$ 为卫星天线相位中心在测站观测方向上的改正值。

(2) GEO 卫星天线相位中心改正模型：

$$\bar{e}_z = -\frac{\bar{r}}{|\bar{r}|}, \bar{e}_y = \bar{e}_z \times \frac{\bar{v}}{|\bar{v}|}, \bar{e}_x = \bar{e}_y \times \bar{e}_z \quad (4-21)$$

其中 \bar{r} 和 \bar{v} 分别为卫星在惯性系下的位置和速度向量。

相位中心改正模型为：

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R_{ciscts} \cdot (\bar{e}_x \quad \bar{e}_y \quad \bar{e}_z) \cdot \begin{pmatrix} x_{phs} \\ y_{phs} \\ z_{phs} \end{pmatrix}, \quad d\rho_{phs} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}^T \cdot \frac{\bar{r}_{sta} - \bar{r}}{|\bar{r}_{sta} - \bar{r}|} \quad (4-22)$$

由名义姿态误差导致的天线相位中心修正误差 URE 损失见下图。图中可以看出，URE 损失优于 0.05m。

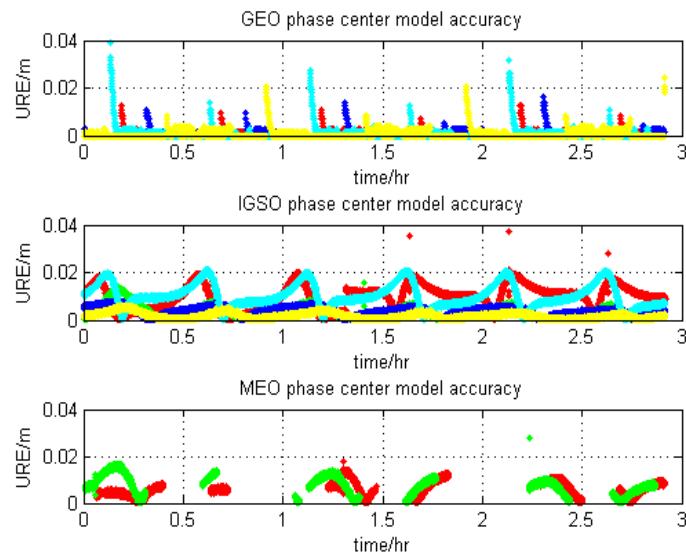


图 13 天线相位中心偏差修正误差

利用上述公式，可以计算各卫星三频点相位中心改正值。

4.2.4 电离层延迟误差

电离层是大气层中的一块电离区域，高范围在 60~100 公里。卫星测量信号在经过电离层时会发生电离层延迟，延迟量大小与电离层中的电子含量和信号频率有关。电子密度与当地时间、地磁纬度和太阳黑子循环有关，在当地时间下午 2 点时达到峰值。对卫星测量来讲，电离层延迟在测站天顶方向可达十几米，而在低高度角时可高达上百米，因此必须通过模型修正。

在不考虑电离层高阶项影响的情况下，对于伪距、相位观测值，电离层的延迟量为：

$$\begin{cases} (V_{ion})_{code} = -\frac{40.28}{f^2} \int_s Neds \\ (V_{ion})_{phs} = +\frac{40.28}{f^2} \int_s Neds \end{cases} \quad (4-23)$$

伪距观测值和相位观测值的电离层延迟改正大小相同，符号相反。根据电离层延迟与信号频率平方成反比的特点，可以通过线性组合的方法对双频观测值修正电离层误差：

$$\begin{cases} PC = \frac{f_i^2}{f_i^2 - f_k^2} P_i - \frac{f_k^2}{f_i^2 - f_k^2} P_k \\ LC = \frac{f_i^2}{f_i^2 - f_k^2} L_i - \frac{f_k^2}{f_i^2 - f_k^2} L_k \end{cases} \quad (4-24)$$

其中, P_i 、 P_k 分别是频率为 f_i 、 f_k 的伪距观测值, L_i 、 L_k 分别是频率为 f_i 、 f_k 的相位观测值, PC 、 LC 分别为伪距和相位无电离层组合观测值。

双频用户可通过双频无电离层组合消除电离层的影响, 但是无法消除电离层高阶的影响, 影响量级为几个厘米, 对于用户米级的定位精度, 可忽略不计。需要注意的是, 将不同频率的观测值进行组合之后, 会将观测噪声放大。

但是对于单频用户来说, 无法通过双频电离层组合消除电离层延迟, GPS 每天提供基于地磁参考系的 Klobuchar 电离层模型参数, 而北斗区域卫星导航系统通过连续监测站的数据处理生成 8 参数电离层模型播发给用户使用, 参数每 2 小时更新一次。北斗用户利用 8 参数和 Klobuchar 模型可计算 B1I 频点信号的电离层垂直延迟改正 $I_z(t)$, 单位为秒, 具体如下:

$$I_z(t) = \begin{cases} 5 \times 10^{-9} + A_2 \cos\left[\frac{2\pi(t-50400)}{A_4}\right], & |t-50400| < A_4 / 4 \\ 5 \times 10^{-9}, & |t-50400| > A_4 / 4 \end{cases} \quad (4-25)$$

式中, $I_z(t)$ 是接收机至卫星连线与电离层交点 (穿刺点 M) 处的地方时 (取值范围为 0~86400), 单位为秒。其计算公式为:

$$t = (t_E + \lambda_M \times 43200 / \pi) \quad (4-26)$$

其中, t_E 是用户测量时刻的 BDT, 取周内秒计数部分, λ_M 是电离层穿刺点的地理经度, 单位为弧度。

A_2 为白天电离层延迟余弦曲线的幅度, 用 α_n 系数求得:

$$A_2 = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \alpha_n \left| \frac{\phi_M}{\pi} \right|^n, & A_2 \geq 0 \\ 0, & A_2 < 0 \end{cases} \quad (4-27)$$

A_4 为余弦曲线的周期, 单位为秒, 用 β_n 系数求得:

$$A_4 = \begin{cases} 172800, & A_4 \geq 172800 \\ \sum_{n=0}^3 \beta_n \left| \frac{\phi_M}{\pi} \right|^n, & 172800 > A_4 \geq 72000 \\ 720000, & A_4 < 72000 \end{cases} \quad (4-28)$$

上述两式中的 ϕ_M 是电离层穿刺点的地理纬度, 单位为弧度。

电离层穿刺点的地理纬度 ϕ_M 、地理经度 λ_M 计算公式为:

$$\phi_M = \arcsin(\sin \phi_u \cdot \cos \psi + \cos \phi_u \cdot \sin \psi \cdot \cos A) \quad (4-29)$$

$$\lambda_M = \lambda_u + \arcsin\left(\frac{\sin \psi \cdot \sin A}{\cos \phi_M}\right) \quad (4-30)$$

上述式中， ϕ_u 为用户地理纬度， λ_u 为用户地理经度，单位均为弧度； A 为卫星方位角，单位为弧度； ψ 为用户和穿刺点的地心张角，单位为弧度，其计算公式为：

$$\psi = \frac{\pi}{2} - E - \arcsin\left(\frac{R}{R+h} \cdot \cos E\right) \quad (4-31)$$

其中， R 为地球半径，取值 6378 千米； E 为卫星高度角，单位为弧度； h 为电离层单层高度，取值 375 千米。

通过公式 $I_{BII}(t) = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{R}{R+h} \cdot \cos E)^2}} I_z(t)$ ，可将 $I_z(t)$ 转化为 B1I 信号传播路

径上的电离层延迟 $I_{BII}(t)$ ，单位为秒。

对于 B2I 信号，其传播路径上的电离层延迟 $I_{BII}(t)$ 需在 $I_{BII}(t)$ 的基础上乘以一个与频率有关的因子 $k(f)$ ，其值为：

$$k(f) = \frac{f_1^2}{f_2^2} = \left(\frac{1561.098}{1207.140}\right)^2 \quad (4-32)$$

其中， f_1 表示 B1I 信号的标称载波频率， f_2 表示 B2I 信号的标称载波频率，单位为 MHz。注：位于南半球的用户使用电离层延迟改正预报模型，电离层延迟改正精度比位于北半球的用户略有降低。

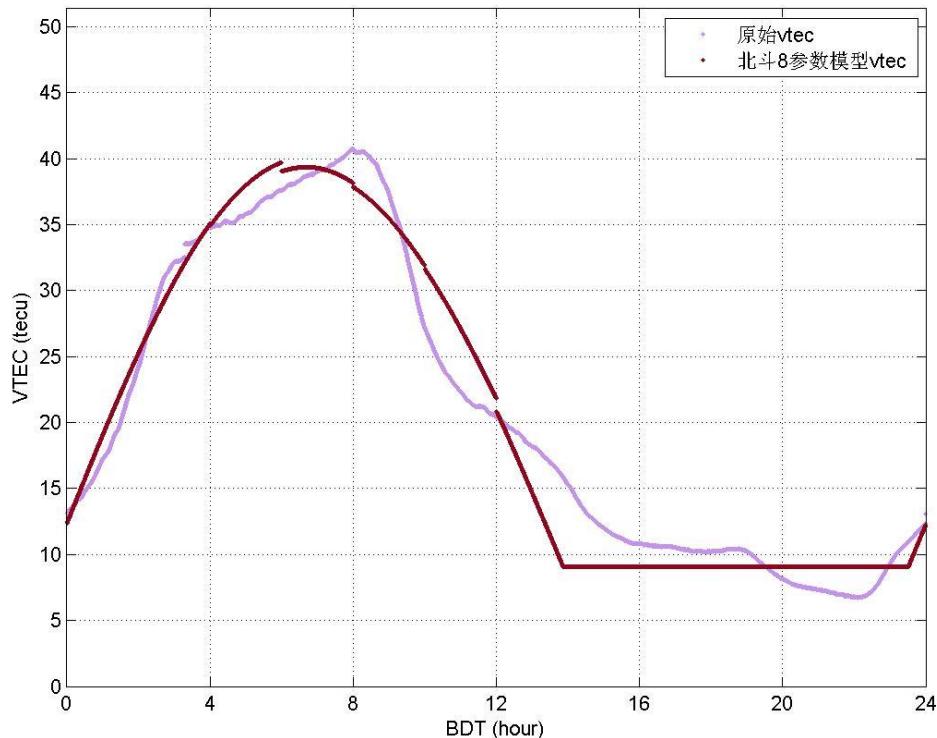


图 14 测站原始观测 VTEC 与电离层模型计算的 VTEC 结果

利用北斗测站实测数据以及北斗播发的电离层 8 参模型，分别计算测站垂直方向电子密度含量（VTEC）。图 14 给出了原始观测 VTEC 与电离层模型计算的 VTEC 结果，淡紫色代表实际观测的 VTEC 结果，深紫色代表北斗电离层 8 参模型 VTEC 计算值，可看到北斗的电离层 8 参模型的 VTEC 计算值与实际观测 VTEC 吻合较好，能真实地反应测站实际的 VTEC 变化量。

Wu X (2012) 等人通过实际观测数据分析表明，北斗的 8 参数电离层模型在中纬度地区提供了更高的校正精度，但对于电离层具有较高变异性低纬度地区，校正精度相对较低。此外，利用中国区域监测网络解算的电离层模型参数进一步评估了全球电离层校正，结果表明，在北半球的亚洲、欧洲和北美地区，使用北斗使用 8 参电离层模型的三维定位比 GPS 使用 Klobuchar 模型的用户三维定位精度提高了 7.8%-35.3%；然而，由于缺乏南半球的监测站，南半球的定位精度有所降低。

4.2.5 对流层延迟误差

GNSS 卫星信号在穿过对流层时，会发生折射，而且传播速度会变慢，从而引起传播距离的误差。信号在对流层中的传播距离与其在真空中的传播距离之差

即为对流层延迟。对流层延迟由两部分组成，一部分是由于传播速度变慢引起的，一部分是由传播路径弯曲引起的。从地面向上约 42km 范围内的大气底层称为对流层，几乎由中性大气组成。对流层与地面接触，具有很强的对流作用，大气成分中除含有各种气体元素外，还含有水滴、冰晶、尘埃等杂质，对电磁波的传播有很大影响。对流层既能改变无线电信号的传播速度又能改变信号的传播方向，从而造成信号传播时延。

卫星导航定位中的对流层延迟通常泛指电磁波信号在 50 公里以下的未被电离的中性大气层时所产生的信号延迟，相对于 15GHz 频率的无线电波，中性气氛是非分散介质，因此，对流层延迟是与频率无关的，无法通过双频方法消除对流层延迟。对流层延迟受气温、气压及湿度等因素的影响，可分为两部分：干延迟和湿延迟，干延迟部分与总的大气压和气温有关，湿延迟部分与水汽压及气温有关。若要求出信号传播途径的对流层延迟，须知道各处的气象元素，这是难以实际测量的，只能测量测站上的气温、气压和水汽压。因此必须建立数学模型，根据测站的气象元素估算空中的气象元素。以下详细介绍对流层延迟的改正模型以及对流层映射函数。

● 对流层延迟改正模型

1) Saastamoinen 模型

Saastamoinen 模型(Saastamoinen, 1972; 1973)是最常用的模型之一。该模型建立在 Shell 定律基础上，需用到大气折射廓线 $n(r)$ 及干、温对流层和干平流层各层的边界值。Saastamoinen 用适用于中纬度地区的美国大气模式(1996)计算出修正系数，然后列表插值。如果考虑到地区和季节的因素，模型的精度会更高些。

Saastamoinen 模型计算公式如下：

$$\begin{aligned} Z_h &= \frac{0.002277 p}{f(\varphi, h)} \\ Z_w &= \frac{0.002277 e(0.05 + \frac{1255}{T})}{f(\varphi, h)} \\ f(\varphi, h) &= 1 - 0.00266 \cos(2\varphi) - 0.28 \times 10^{-6} h \end{aligned} \quad (4-33)$$

式中， Z_h 、 Z_w 分别表示测站天顶方向的对流层干、湿延迟， φ 、 h 、 p 、 T 、 e 分别表示测站的纬度、大地高(m)、大气压(mbar)、绝对温度(K)、水汽压(mbar)。

2) Hopfield 模型

Hopfield 模型(Hopfield, 1969; 1971)利用全球性平均资料中总结干、湿大气层的高度和大气折射指数，采用全球 18 个台站一年的平均资料获取模型的经验系数。模型计算公式如下：

$$\begin{aligned}
 \Delta STD &= mf_h \times Z_h + mf_w \times Z_w \\
 mf_h &= \frac{1}{\sin(E^2 + 6.25)^{1/2}} \\
 mf_w &= \frac{1}{\sin(E^2 + 2.25)^{1/2}} \\
 Z_h &= 1.552 \times 10^{-5} \times \frac{P_s}{T_s} \times (h_d - h_s) \\
 Z_w &= 1.552 \times 10^{-5} \times \frac{4810}{T_s^2} \times (h_w - h_s) \times e_s \\
 h_d &= 40136 + 148.72 \times (T_s - 273.16)
 \end{aligned} \tag{4-34}$$

式中， E 为高度角， P_s 为地表气压(hPa)， T_s 为地表温度(K)， e_s 为地表水汽压(hPa)， $h_w = 11000m$ 。

● 映射函数

Neill 采用全球分布(主要是北半球)的 26 个探空气球站收集的资料建立了 NMF(Neill Mapping Function)模型(Neill, 1996)。

NMF 映射函数也采用 MTT 函数的三级连分形式，干映射系数 a_h 计算如下：

$$a_h(\varphi, t) = a_{avg}(\varphi) + a_{amp} \cos(2\pi(doy - 28) / 365.25) \tag{4-35}$$

式中， φ 为测站纬度， doy 是年积日，参数 a_{avg} 、 a_{amp} 与测站位置相关，可以根据 NMF 参数表提供的全球不同纬度的参数值，内插得到。参数 b_h 、 c_h 以及 a_w 、 b_w 、 c_w 也由 NMF 提供的参数表线性内插获得。

NMF 模型需要根据测站高程进行干映射函数的改正，改正式如下所示：

$$mf(E) = \frac{\frac{1 + \frac{a}{b}}{1 + \frac{c}{a}} + \left(\frac{1}{\sin E} - \frac{1 + \frac{a_{ht}}{b_{ht}}}{1 + \frac{c_{ht}}{a_{ht}}} \right) \times h \times 10^{-3}}{\sin E + \frac{b}{\sin E + c}} \tag{4-36}$$

4.2.6 接收机钟差误差

与卫星钟一样，接收机钟也有误差。由于接收机大多采用石英钟，因而其钟误差较卫星钟更为显著。该误差项主要取决于钟的质量，与使用时的环境也有一定关系。接收机钟差难以通过模型消除，因此将接收机钟差设为未知参数进行求解。

4.2.7 地球自转改正

卫星导航系统一般在协议地球坐标系中进行数据处理，在卫星发射信号时刻 t_1 由系统播发的广播星历计算的的卫星位置为地固系中的三维坐标，在卫星信号到达接收机的时刻 t_2 ，由于在信号传播的时间段内，地固坐标系已随着地球自转轴进行了旋转，旋转角度为 $\Delta\alpha = \omega(t_2 - t_1)$ ，总而引起的观测距离的误差称为地球自转效应。如果误差没有修正，将会在用户定位中引起 30m 的误差 (M Weiss, 1999)。

地球自转效应引起的卫星坐标变化为：

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin \Delta\alpha & 0 \\ -\sin \Delta\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{t_1}^s \\ Y_{t_1}^s \\ Z_{t_1}^s \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & \Delta\alpha & 0 \\ -\Delta\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{t_1}^s \\ Y_{t_1}^s \\ Z_{t_1}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega(t_2 - t_1)Y_{t_1}^s \\ -\omega(t_2 - t_1)X_{t_1}^s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-37)$$

将上述修正量加到卫星坐标 $[X_{t_1}^s \ Y_{t_1}^s \ Z_{t_1}^s]^T$ ，就可以得到卫星在 t_2 时刻地固系中的坐标。

4.2.8 地球固体潮改正

由于地球表面并非刚性，在太阳和月球的万有引力作用下，其形状随着时间而变化，地球表面这种周期性运动被称为地球固体潮汐。由潮汐引起的周期性的垂直和水平位移可以用 Love 数 h_{nm} 和 Shida 数 l_{nm} 表征的阶数为 ($n m$) 球谐函数表示。这些数字的有效值取决于台站纬度和潮汐频率 (Wahr, 1981)，并且仅在测站精度为 1mm 时需要考虑 (参见例如 IERS 公约 (IERS, 1996))。然而，对于 5mm 的定位精度，仅需要第二阶潮汐项和垂直改正项。

测站位移坐标量在笛卡尔坐标系中可表示为 $\Delta\vec{r}^T = |\Delta x, \Delta y, \Delta z|$ (IERS, 1989)

$$\begin{aligned} \Delta\vec{r} = & \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM} \frac{r^4}{R_j^3} \left\{ \left[3l_2(\hat{R}_j \cdot \hat{r}) \right] \hat{R}_j + \left[3\left(\frac{h_2}{2} - l_2\right)(\hat{R}_j \cdot \hat{r})^2 - \frac{h_2}{2} \right] \hat{r} \right\} \\ & + \left[-0.025m \cdot \sin\phi \cdot \cos\phi \cdot \sin(\theta_g + \lambda) \right] \cdot \hat{r} \end{aligned} \quad (4-38)$$

式中， GM 、 GM_j 分表表示地球、太阳 ($j=2$)、月球 ($j=3$) 的引力参数； r 、 R_j 代表测站和月球、太阳的质心至地心的距离，对应的单位向量分别是 \hat{r} 、 \hat{R}_j ； l_2 和 h_2 是标称的二阶 Love 数、Shida 数 (0.609, 0.085)； ϕ 、 λ 是测站的经度、纬度； θ_g 表示格林尼治平恒星时 (GMST, Greenwich Mean Sidereal Time)。固体潮改正量在径向可达到 30cm，水平方向可达 5cm。它由与纬度相关的永久性位移和以是半天和昼夜变化幅度为主的周期性部分组成，周期性地变化可通过长时间的静态观测 (24h) 可消除，但是永久性位移无法通过长时间的静态观测

消除，在中纬度地区径向误差能达到 12cm。若在用户定位中忽略潮汐改正，会在径向和北向分别引起 12.5 和 5cm 的定位误差。值得注意的是，在使用公式(1)修正地球固体潮时必须与 ITRF 约定一致。另外，对于短基线（<100km）的差分定位，两个测站的潮汐位移几乎相同，使得短基线的相对位置将在很大程度上不受固体地球潮汐的影响。

4.2.9 伪距多路径观测噪声

北斗导航系统在不同频率的载波上调制了伪随机噪声码，接收机通过测距码的对齐获取观测数据。目前进行数据测量，P 码、相位的测量精度一般为 0.3m、0.005m。因此可用相位数据平滑伪距观测值，提高伪距精度，具体算法详见 4.3.1 小节。目前对北斗伪距精度的研究较少，赵齐乐等人（2016）研究发现：北斗伪距观测量的测量噪声在 0.1~0.5 米范围内，随高度角的增大而减小；不同频率的伪距噪声各有差异，高度角增大时差异减小，所有测站中 B1 的伪距噪声最大，B2、B3 的大小关系随测站而异，地球同步轨道卫星的伪距精度优于倾斜地球同步轨道和中地球轨道卫星，且后两者差距较小。

在卫星信号测量中，被测站附近的反射物所反射的卫星信号（反射波）如果进入接收机天线，将与直接来自卫星的信号（直射波）产生干涉，从而使观测值偏离真值，产生所谓的多路径误差。这种由于多路径的信号传播所引起的干涉时延效应被称为多路径效应。多路径效应对载波相位测量观测值的影响为厘米量级，但是对伪距观测量的影响较大，误差能达到米级。多路径误差的大小与反射物离测站的距离、卫星信号的传播方向以及反射物的反射系数等因素相关，很难求出观测瞬间的多路径误差值。为了消除和削弱多路径带来的影响，选择合适的站址，并使用带有抑径板或抑径圈的接收机。另外也有 MHM (Multipath Hemispherical Map) 和 SF (Sidereal Filtering) 模型利用静态环境下的多径效应的时空重复性，用于校正实时 GNSS 数据处理的多径误差(Dong D, 2016; Danan DONG, 2016)。

利用 2017 年 3 月 16 日北斗实测数据，通过高阶拟合，伪距、相位的噪声结果如下：

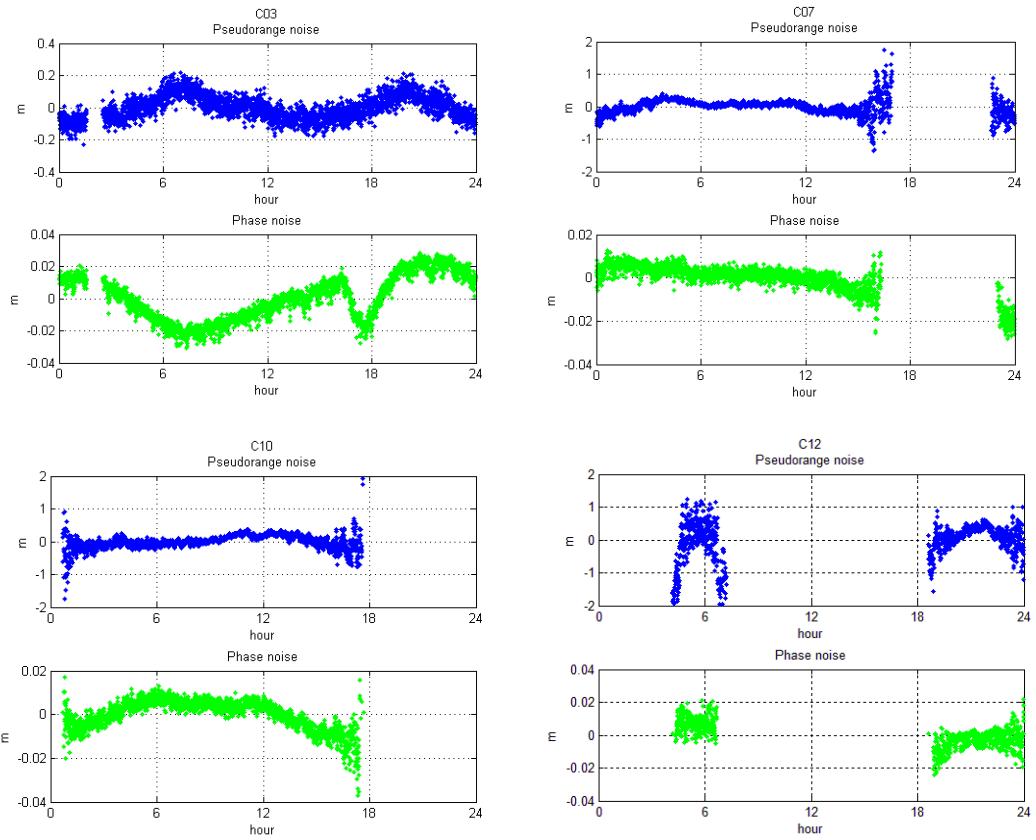


图 15 伪距观测数据的噪声结果（图中蓝色部分表示伪距噪声，绿色部分表示相位噪声）

3 号卫星为 GEO 卫星，7、10 号是 IGSO 卫星，12 是 MEO 卫星，通过图 15 结果，可看到相位数据噪声均在 1~2cm 之间，而 GEO 卫星伪距观测值的噪声比 IGSO、MEO 的伪距噪声小，且移动卫星的伪距噪声高度角的增大而减小，在卫星出入境时伪距噪声明显增大，甚至达到米级。

4.3 观测值数据预处理方法

4.3.1 周跳探测

相位观测值，是将载波当做测距信号进行相位测量后的观测值。由于载波是一种没有任何标记的余弦波，而接收机钟的鉴相器量测载波相位时，只能测定不足一周的部分，因而会产生整周数不确定的问题。但是当信号受到建筑物等物体的阻挡、接收机高速运动或者卫星高度角过低而引起低信噪比时，载波相位容易发生周跳。周跳会使得载波相位观测值出现整周偏差现象，影响差分数据的处理。因此在使用相位观测数据时，必须先判断一段连续的相位观测值是否存在周跳，对于发生周跳的数据需进行周跳修复或舍弃发生周跳的相位数据。

针对相位周跳探测，目前常用的周跳探测方法有⁶种，本文介绍多项式拟合法、电离层残差法。

在数据处理中，本文使用了伪距数据以及相位历元间差分数据，伪距数据用于确定改正数的基准，而相位历元间差分数据能够精确求取改正数的历元间的变化。相位历元间差分数据需要前后两个历元的相位数据没有发生周跳，这就涉及到相位数据的周跳探测，周跳探测的方法有⁶种，本文简单介绍高次差法、多项式拟合法等。

● 多项式拟合法

多项式拟合法的做法如下：将 m 个无周跳的载波相位观测值 $\tilde{\phi}_i$ 带入下式，进行多项式拟合：

$$\tilde{\phi}_i = a_0 + a_1(t_i - t_0) + a_2(t_i - t_0)^2 + \cdots + a_n(t_i - t_0)^n \quad (4-39)$$

$$(i = 1, 2, \dots, m; m > n + 1)$$

用最小二乘法求得式中的多项式系数 a_0, a_1, \dots, a_n ，并根据拟合后的残差 V_i 计算出中误差 $\sigma = \sqrt{\frac{[V_i V_i]}{m - (n + 1)}}$ 。用求得的多项式系数来外推下一历元的载波相位观测值，并与实际的观测值进行比较，当两者之差小于 3σ 时，认为该观测值无周跳。去掉最早的一个观测值，加入上述无周跳的实际观测值后形成滑动窗口，继续上述过程进行多项式拟合。当外推值与实际观测值之差 $\geq 3\sigma$ 时，认为实际观测值有周跳。此时滑动窗口需要重新初始化，然后继续上述过程，直至最后一个观测值为止。需要说明的是：

由于卫地距对时间的四阶导数或五阶导数一般已趋近于 0，已呈现随机误差特性，无法再使用多项式来进行拟合。固多项式中的阶数 n 一般取 3 即可。（李征航）

● 电离层残差法

电离层残差组合的定义为：

$$L_t = L_1 - L_2 \quad (4-40)$$

该组合也称无几何组合，对于伪距也有类似组合。该组合与接收机钟差、卫星轨道以及测站坐标无关，仅含有电离层延迟和初始相位模糊度。

上式可以写为：

$$L_t = \lambda_1 \phi_1 - \lambda_2 \phi_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 - \frac{I}{f_1^2} + \frac{I}{f_2^2} \quad (4-41)$$

将上式两端同除以 λ_1 ，则有：

$$\frac{L_t}{\lambda_1} = \phi_1 - \frac{f_1}{f_2} \phi_2 = N_1 - \frac{f_1}{f_2} N_2 - \frac{I}{\lambda_1 f_1^2} + \frac{I}{\lambda_1 f_2^2} \quad (4-42)$$

令 $\phi_t = \frac{L_t}{\lambda_1}$ ，上式可写为：

$$\phi_I = N_1 - \frac{f_1}{f_2} N_2 - \Delta_{ion} \quad (4-43)$$

式中， $\Delta_{ion} = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2} \cdot \frac{I}{\lambda_1 f_1^2}$ ，当利用 B1 频率 $f_1 = 1561.098\text{MHz}$ 和 B2 频率 $f_2 = 1268.52\text{MHz}$ 时， ϕ_I 还将电离层延迟的影响减小了约 49%（因为 $(f_2^2 - f_1^2)/f_2^2 \approx 51\%$ ），它与载体的运动状态无关，在没有周跳时，它随时间变化缓慢，一旦有周跳产生，它就会有比较显著的变化。因此其相邻历元的差值可以用来检测周跳。

其差值为：

$$\begin{aligned} \delta\phi_I &= \phi_{I,k+1} - \phi_{I,k} = \delta N_I - \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2} \cdot \frac{\delta I}{\lambda_1 f_1^2} + \delta\varepsilon_I \\ \delta N_I &= \delta N_1 - \frac{f_1}{f_2} \delta N_2 \end{aligned} \quad (4-44)$$

式中 δN_1 、 δN_2 分别表示载波相位观测值 ϕ_1 、 ϕ_2 的周跳； δI 、 $\delta\varepsilon_I$ 分别表示电离层延迟和观测值噪声的变化量。如果观测值没有周跳，即 δN_1 和 δN_2 都为零，若前后两个历元间隔较短如几秒钟，则 $|\delta\phi_I|$ 一般小于 0.05 周；但前后两个历元间隔时间较长如几分钟，则 $|\delta\phi_I|$ 会超过 0.1 周。

周跳检测时通过设定相应的阈值，判断是否发生了周跳。如果周跳检测阈值设置过小，多径干扰被误认为周跳发生，发生误判；如果周跳检测阈值设置过大，某些周跳不能准确检测，会造成模糊度解算误差，最终在相位计算的改正信息中引入较大偏差。通过各监测站伪距波动现象的分析，宽相关数据单频点多径扰动幅度最大约在 4~5 米，窄相关和抗多径数据单频点多径扰动幅度最大约在 1~2 米。根据实际数据质量来设置周跳阈值。

4.3.2 相位平滑伪距

根据 4.2.9 小节对北斗伪距、相位观测值噪声的结果分析，相位观测值噪声远小于伪距噪声，比伪距观测值噪声小 2 个数量级，因此可通过相位数据平滑伪距，来抑制伪距多路径和噪声的影响。现目前应用较多的为 Hatch 滤波方法（Hatch R, 1983），WAAS 为了消除伪距噪声和多径干扰的影响，发展了多径消除算法，应用于 WAAS 参考站，降低伪距噪声和多路径效应（Shallberg K, 2001；Phelts R E, 2004；Bruckner D, 2011）；WU XiaoLi (2011) 等人在此基础上，针对北斗区域导航系统的特点，提出了实时多径消除算法，应用于我国区域卫星导航系统，对伪距观测量进行多径和噪声改正，称其为 CNMC (Code Noise and Multipath Correction) 方法。

同历元伪距和相位观测值的差值可以写为:

$$CMC = P_i - L_i = 2\Delta I_i + N\lambda_i + \varsigma_i - \varepsilon_i \quad (4-45)$$

式中, i 表示频点, P_i 、 L_i 分别表示伪距、相位观测值, ΔI_i 是电离层延迟, N 、 λ_i 分别表示整周模糊度、载波波长, ς_i 、 ε_i 表示伪距、相位观测值噪声。因为相位噪声远比伪距噪声小, 所以 ε_i 值可以忽略。

根据双频载波相位组合观测量可以计算带模糊度的电离层延迟改正, B1、B2 双频载波相位观测量之差:

$$L_1 - L_2 = \Delta I_2 - \Delta I_1 + b_{12} \quad (4-46)$$

式中, b_{12} 包含了相位的双频整周模糊度之差, 在后续的估计中假定该参数在一个未发生周跳的连续弧段内保持为常数。

经过推导, 可得到 B1 频点的电离层延迟为:

$$\Delta I_1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1 - L_2 - b_{12}) \quad (4-47)$$

同理可得 B2 频点的电离层延迟为:

$$\Delta I_2 = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1 - L_2 - b_{12}) \quad (4-48)$$

不同频点多径改正需单独计算的, 以 B1 频点为例, 实时进行伪距和多径改正的 CNMC 算法如下:

$$\begin{aligned} \varsigma_1 &= P_1 - L_1 - 2\Delta I_1 - N\lambda_1 \\ &= P_1 - L_1 - \frac{2f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1 - L_2) + \frac{2f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{12} - N\lambda_1 \\ &= P_1 - L_1 - \frac{2f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1 - L_2) + CBias_1 \end{aligned} \quad (4-49)$$

设 $CBias_1 = \frac{2f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{12} - N\lambda_1$, 因为 $CBias_1$ 为相位的双频整周模糊度之差与模糊度的线性组合, 所以在未发生周跳的连续弧段内保持不变, 为一常数。

假定累积多径误差满足均值为零, 在 t_0 时刻进行初始化:

$$CBias_1(t_0) = P_1(t_0) - L_1(t_0) - \frac{2f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1(t_0) - L_2(t_0)) \quad (4-50)$$

随着历元累积, 在未发生周跳的情况下, t_i 时刻的常数偏差为:

$$CBias_1(t_i) = CBias_1(t_{i-1}) + \frac{1}{i} [P_1(t_{i-1}) - L_1(t_{i-1}) - CBias_1(t_{i-1}) - \frac{2f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1(t_{i-1}) - L_2(t_{i-1}))] \quad (4-51)$$

经相位数据平滑伪距观测值为：

$$\begin{aligned}\bar{P}_i(t_0) &= P_i(t_0) \\ \bar{P}_i(t_i) &= L_i(t_i) + \frac{2f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_i(t_i) - L_2(t_i)) + CBias_i(t_i)\end{aligned}\quad (4-52)$$

当相位数据检测到周跳时，CNMC 需要重新开始初始化。

以 2017 年 3 月 6 日北斗实测数据为例，比较 CNMC 前后伪距 O-C 值，GEO 卫星 C01、C04 和 IGSO 卫星 C07 以及 MEO 卫星 C14 的结果如下图所示，图中红色的点代表原始北斗伪距观测数据计算的 O-C 的结果，蓝色曲线代表通过 CNMC 平滑后伪距数据计算的 O-C 的结果。红色的点波动较大，伴随明显的伪距噪声，而蓝色曲线较为平滑连续，因此 CNMC 平滑方法能够很好地抑制伪距带来的噪声。

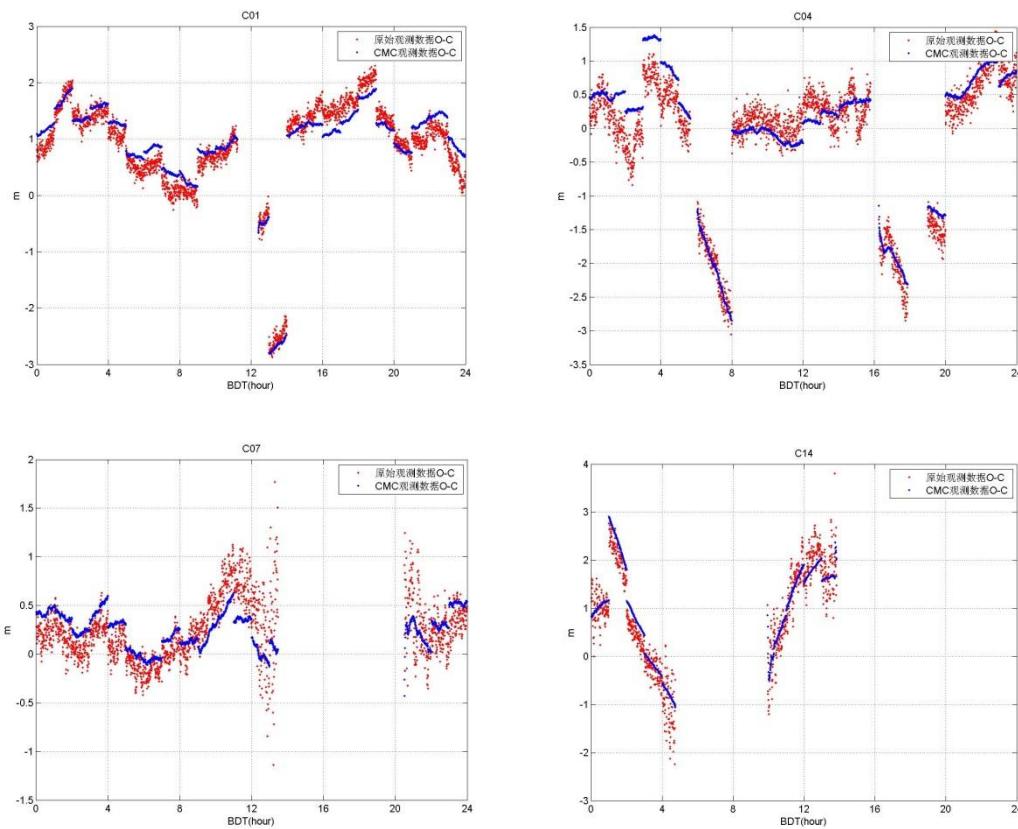


图 16 北斗卫星 CNMC 平滑前后伪距 O-C 的结果

4.4 轨道改正数模型

4.4.1 轨道误差对测距误差的影响分析

距离测量中的卫星钟差误差与方向无关，而卫星星历误差对不同用户视线方

向投影的影响主要为卫星轨道径向方向，如图 17 所示。

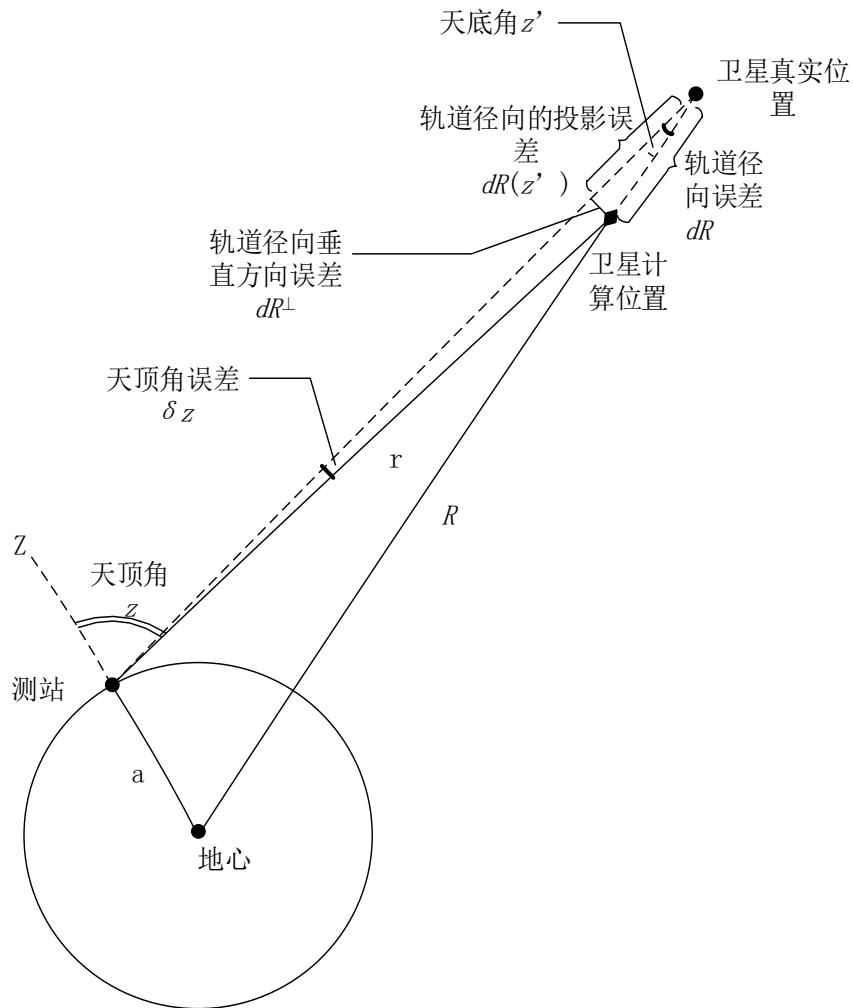


图 17 卫星轨道误差对测站测距影响示意图

图中 R 为卫星距离地心的距离， dR 为轨道径向误差， dR^\perp 为径向垂直方向的轨道误差。从图中可以得出：忽略 dR^\perp 的影响，如果卫星轨道在径向 \bar{R} 方向存在一个偏差 dR ，则该偏差在卫星天底角 z' 视向方向的观测改正量 $dR(z')$ 可以表示为 (Zhu S Y, 2003)：

$$dR(z') = dR \cdot \cos z' \quad (4-53)$$

超过 95%以上轨道径向误差 dR 会被钟差参数吸收 (Ge M, 2005)，因此轨道误差对用户定位的影响主要是由于不同视向上观测改正的差值 $\Delta dR(z')$ (Schmid R, 2007)，即：

$$\Delta dR(z') = dR \cdot (1 - \cos z') \quad (4-54)$$

根据卫星星座参数，GPS 卫星最大天底角约为 14 度，GLONASS 卫星最大天底角约为 14.3 度，北斗 GEO/IGSO 卫星最大天底角约为 8.7 度，而北斗 MEO

卫星最大天底角约为 13.5 度（北斗 ICD，2013）。

由于 $1 - \cos(8.7^\circ) = 1.2\%$ ， $1 - \cos(13.5^\circ) = 3.1\%$ ，所以北斗卫星轨道径向误差在不同天底角引起的测距误差占轨道径向误差的比例为 1.2-3.1%。考虑到目前米级的轨道精度（Montenbruck O, 2015），轨道径向误差在不同方向造成的测距误差在厘米量级。

下面对轨道切向和法向误差对测距引起的误差进行分析，图 18 表示了轨道各个方向误差引起的用户测距误差。

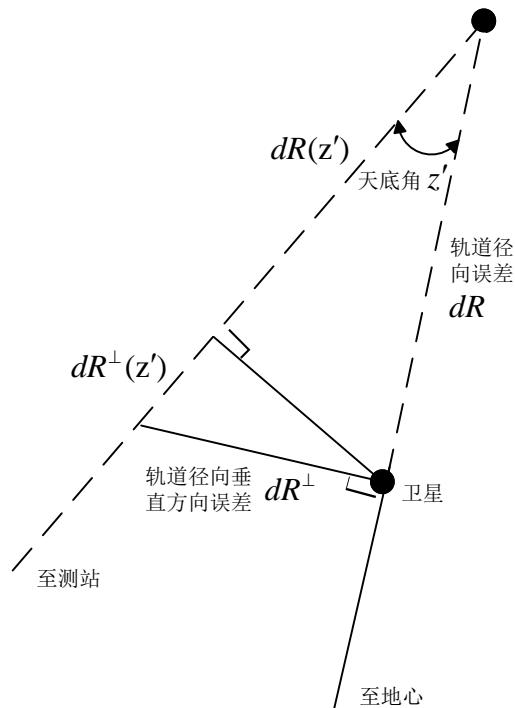


图 18 轨道各分量误差对测站测距影响示意图

图中，轨道径向方向对用户测距的影响 $dR(z')$ 由公式 (3-2) 计算，轨道的切向和法向的误差均垂直于轨道径向，因此将统一讨论，将轨道法向和切向综合方向的轨道误差表示为 dR^\perp ，其对用户测距的影响 $dR^\perp(z')$ 为：

$$dR^\perp(z') = dR^\perp \cdot \sin(z') \quad (4-55)$$

测站若位于卫星对地径向方向则测距不受轨道误差 dR^\perp 的影响，而在卫星高度角为 0 的时候 dR^\perp 的影响达到最大。根据北斗卫星星座参数，北斗 GEO/IGSO 卫星最大天底角约为 8.7 度，而北斗 MEO 卫星最大天底角约为 13.5 度，在卫星高度角为 0 的情况下， $\sin(8.7^\circ) \approx 15.1\%$ ， $\sin(13.5^\circ) \approx 23.3\%$ ，因此，卫星轨道径向垂直方向的误差在不同天底角引起的测距误差占轨道误差 dR^\perp 的比例，GEO/IGSO 卫星最大可达 15%，MEO 卫星最大可达 23%。目前北斗 GEO 卫星轨道切向误差在 8-10m，轨道法向误差约为 1-2m，IGSO/MEO 卫星轨道切向和

法向误差均为 1-2m (Montenbruck O, 2015)。从而轨道法向以及切向的误差在不同视线方向影响较大，全球范围内 GEO 卫星法向以及切向轨道误差投影差异最大可达到米级，IGSO/MEO 卫星法向以及切向轨道误差投影差异最大可达到分米级。因此对于更高精度的广域差分定位需求，需要在广域差分中考虑轨道误差在不同测站方向投影差异不同这一问题。

4.4.2 基本模型

任意测站对一颗卫星 sat 的无电离层组合伪距、相位观测方程为：

$$\begin{aligned} P_i &= \rho(x^{sat}) + c \cdot (\tau_{rec} - \tau^{sat}) + (b_{ifb} - b^{tgd}) + m \cdot ZTD + \varsigma \\ L_i &= \rho(x^{sat}) + c \cdot (d\tau_{rec} - d\tau^{sat}) + N + m \cdot ZTD + \varepsilon \end{aligned} \quad (4-56)$$

式中， P_i, L_i 分别伪距、相位观测值； ρ 为星地理论距离，受卫星轨道 x^{sat} 误差的影响； i 为频点标识； τ_{rec}, τ^{sat} 分别为测站和卫星钟差； b_{ifb}, b^{tgd} 分别为测站和卫星伪距的硬件延迟； N 为模糊度参数； m 和 ZTD 为对流层投影函数以及天顶对流层延迟； ς, ε 为包含多路径误差等的噪声。

在 (4-56) 式中，卫星伪距硬件延迟频间偏差参数 b^{tgd} 的残余误差会被吸收到卫星钟差中，而测站伪距硬件延迟频间偏差参数 b_{ifb} 的残余误差会被吸收到测站钟差参数中。

基于以上轨道径向、切向和法向的误差给用户测距方向带来的影响分析，有必要在广域差分参数中引入三维的轨道改正数。基于几何法定轨的原理，定义 (4-56) 式待求参数为 $d\mathbf{p} = [dx^{sat} \quad dy^{sat} \quad dz^{sat}]^T$ 。将 (4-56) 式进行钟差改正数修正后，伪距观测值展开为：

$$\begin{aligned} P &= \rho^0 + \frac{\partial P(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{p}} d\mathbf{p} + \varsigma \\ &= \rho^0 - \frac{x^{sat} - x}{|\bar{r}^{sat} - \bar{r}|} \cdot dx^{sat} - \frac{y^{sat} - y}{|\bar{r}^{sat} - \bar{r}|} \cdot dy^{sat} - \frac{z^{sat} - z}{|\bar{r}^{sat} - \bar{r}|} \cdot dz^{sat} + \varsigma \\ &= \rho^0 + A \cdot d\mathbf{p} + \varsigma \end{aligned} \quad (4-57)$$

其中 ρ^0 为修正了公共误差的星地几何距离； $(x^{sat}, y^{sat}, z^{sat})$ 为基于广播星历获取的该历元卫星轨道，而 \bar{r}^{sat} 为其矢量； $(dx^{sat}, dy^{sat}, dz^{sat})$ 为待求的轨道改正数； (x, y, z) 为测站的坐标， \bar{r} 为其矢量； A 为系数阵，

$$A = \left[\begin{array}{ccc} \frac{x^{sat} - x}{|\bar{r}^{sat} - \bar{r}|} & \frac{y^{sat} - y}{|\bar{r}^{sat} - \bar{r}|} & \frac{z^{sat} - z}{|\bar{r}^{sat} - \bar{r}|} \end{array} \right]^T.$$

4.4.3 相位历元间差分模型

以上采用的计算数据为监测站的伪距观测值，其计算精度受到伪距噪声的影响。虽然 CNMC 能够减小多路径的误差，但是该算法的有效性较大程度上依赖于相位数据的连续性。在相位观测存在新模糊度时，CNMC 需要重新收敛。

为提高广域差分参数求取的精度，需要在伪距观测值处理的基础上增加相位观测值。(4-56) 式中的相位观测值处理包含了模糊度参数。在实时逐历元处理模式下，模糊度参数的存在将造成实时差分参数存在较长时间的收敛过程。此外在出现数据中断或者周跳的情况下，模糊度参数需要重新收敛。为此可采用以上历元间相位差分的方法，求取轨道改正数在历元间的变化。

在钟差改正修正后，对(4-56) 中相邻历元 t_i, t_{i-1} 的相位观测值作差分，得到：

$$\Delta L(t_{i-1}, t_i) = \Delta \rho(x_{i-1}^{sat}, x_i^{sat}) + c \cdot (\Delta \tau_{rec} - \Delta \tau^{sat}) + \Delta m \cdot ZTD + \Delta \varepsilon \quad (4-58)$$

(4-58)式中 Δ 为差分算子，可以看到历元间差分后，在没有周跳的情况下，模糊度得到了消除；历元间对流层延迟的差异体现在投影函数的差异上，在轨道改正数更新的周期内(一般为 6 分钟)该项影响可忽略。(4-58) 式中的待求参数包括卫星轨道、钟差改正数以及测站钟差改正数，由于没有模糊度参数，因此以上方程解算不存在收敛性的问题。并且在数据丢失或者周跳的情况下，只会影响一个历元的处理。以上历元间相位差分的方法，求取的是轨道改正数在历元间的变化。

应用 Taylor 级数一阶展开，对(4-58) 式线性化得：

$$\begin{aligned} \Delta L(t_{i-1}, t_i) &= \Delta L^0(t_{i-1}, t_i) + \frac{\partial \Delta L(x_i, x_{i-1})}{\partial x_i} dx_i + \frac{\partial \Delta L(x_i, x_{i-1})}{\partial x_{i-1}} dx_{i-1} \\ &= \Delta \rho^0(x_{i-1}^{sat}, x_i^{sat}) - \frac{x_i^{sat} - x}{|\bar{r}_i - \bar{r}|} dx_i^{sat} - \frac{y_i^{sat} - y}{|\bar{r}_i - \bar{r}|} dy_i^{sat} - \frac{z_i^{sat} - z}{|\bar{r}_i - \bar{r}|} dz_i^{sat} \\ &\quad + \frac{x_{i-1}^{sat} - x}{|\bar{r}_{i-1} - \bar{r}|} dx_{i-1}^{sat} + \frac{y_{i-1}^{sat} - y}{|\bar{r}_{i-1} - \bar{r}|} dy_{i-1}^{sat} + \frac{z_{i-1}^{sat} - z}{|\bar{r}_{i-1} - \bar{r}|} dz_{i-1}^{sat} + \Delta \varepsilon \end{aligned} \quad (4-59)$$

其中， $\Delta \rho^0(x_{i-1}^{sat}, x_i^{sat})$ 修正了等效钟差计算过程中的所有钟差参数以及公共误差； $(x_i^{sat}, y_i^{sat}, z_i^{sat})$ ， $(x_{i-1}^{sat}, y_{i-1}^{sat}, z_{i-1}^{sat})$ 分别为历元 t_i ， t_{i-1} 轨道的初值，而 \bar{r}_i, \bar{r}_{i-1} 为其矢量； $(dx_i^{sat}, dy_i^{sat}, dz_i^{sat})$ ， $(dx_{i-1}^{sat}, dy_{i-1}^{sat}, dz_{i-1}^{sat})$ 分别为历元 t_i ， t_{i-1} 轨道的改正数； (x, y, z) 为测站的坐标， \bar{r} 为其矢量。

定义 $p = (p_i, p_{i-1})$ 为(4-58)式的待求参数，应用最小二乘，在 p_0 处将(4-58)

式写成误差方程的形式:

$$\Delta L(t_{i-1}, t_i) - \Delta L^0(t_{i-1}, t_i) = A_i \cdot d\mathbf{p}_i - A_{i-1} \cdot d\mathbf{p}_{i-1} \quad (4-60)$$

A_i, A_{i-1} 为 t_i, t_{i-1} 的系数矩阵。定义 $d\Delta p_i = d\mathbf{p}_i - d\mathbf{p}_{i-1}$ 为轨道参数在历元间的变化，同时定义 $l = \Delta L(t_{i-1}, t_i) - \Delta L^0(t_{i-1}, t_i)$ ，则 (4-60) 式可以重新写为:

$$A_i \cdot d\Delta p_i - \delta A_i \cdot d\mathbf{p}_{i-1} = l \quad (4-61)$$

式中， $\delta A_i = A_i - A_{i-1}$ ，对于钟差改正数 δA_i 为 0 矩阵。对于轨道改正数， δA_i 与历元间隔以及卫星运动速度有关，根据陈俊平 (2007) 的分析，忽略 $\delta A_i \cdot d\mathbf{p}_{i-1}$ 引起的最大误差约为 $\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot d\mathbf{p}_{i-1} \cdot d\theta$ ，其中 $d\theta$ 为卫星运动弧段相对地面的角度变化。北斗导航卫星的最大运动速度小于 4 公里/秒，在采用率为 20 秒，基于目前轨道精度，忽略 $\delta A_i \cdot d\mathbf{p}_{i-1}$ 产生的误差不超过 1cm。因此，对于轨道改正参数的求取，(4-61) 式中的 $\delta A_i \cdot d\mathbf{p}_{i-1}$ 项可忽略，(4-61) 式可重新写为:

$$A_i \cdot d\Delta p_i = l \quad (4-62)$$

以上即为基于相位历元间差分的广域差分改正数模型。模型采用了高精度的相位观测值，消除了模糊度参数，简化了相位观测数据处理的复杂度，提高了广域差分改正数解算的精度。

以上即为基于相位历元间差分观测的轨道改正数模型。模型采用了相位观测，因而参数求取的精度比伪距更高。此外，模糊消除了模糊度参数，数据处理的模式与伪距观测一致。基于该算法得到的是历元间轨道改正数的变化量。在此基础上，采用以上伪距相位综合等效钟差模型，将高精度的轨道改正数历元变化与伪距计算的轨道改正数进行综合，获取轨道改正数。

4.4.4 伪距相位综合的轨道改正模型

利用 (4-62) 式计算得到的是历元间轨道改正数的变化量。基于伪距观测值利用 (4-56) 式解算的是卫星轨道改正数的绝对值。在卫星轨道历元间变化结果中，只要已知其中一个历元的绝对值，所有与该历元一起形成连续观测的卫星轨道也被确定，这在测量平差领域就归结为基准问题。

将历元 t_i 基于伪距的卫星轨道为 $\mathbf{p}_{c,i}$ 作为实际参数的虚拟观测值，可写为:

$$\hat{\mathbf{p}}_i - \mathbf{p}_{c,i} = v_{c,i} \quad (4-63)$$

式中 \hat{p}_i 为历元 t_i 参数的真实值, $v_{c,i}$ 为残差。

定义历元 t_i 基于相位的卫星轨道、钟差变化为 $p_{\varphi,i} - p_{\varphi,i-1}$, 将其也作为虚拟观测值, 可写为:

$$(\hat{p}_i - \hat{p}_{i-1}) - (p_{\varphi,i} - p_{\varphi,i-1}) = v_{\Delta\varphi,i} \quad (4-64)$$

式中 \hat{p}_i , \hat{p}_{i-1} 为历元 t_i , t_{i-1} 参数的真实值, $v_{\Delta\varphi,i}$ 为残差。

以每个历元的方差阵 P_i 作为权阵, 伪距相位权重比取 1:2000。对处理弧段的所有 n 个历元迭加, (4-63) 式写为法方程的形式为:

$$E^T \cdot P_c \cdot E \cdot \hat{p} = E^T \cdot P_c \cdot x_c \quad (4-65)$$

式中 E 为单位阵。(4-64) 式写为法方程的形式:

$$C^T \cdot P_\varphi \cdot C \cdot \hat{p} = C^T \cdot P_\varphi \cdot \Delta p_\varphi \quad (4-66)$$

(4-66) 式中, C 为 (4-64) 式对应的系数阵, 为:

$$C = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 1 \end{pmatrix}_{n \times n} \quad (4-67)$$

P_c 和 P_φ 为伪距和相位的分块权矩阵, 且有:

$$\begin{aligned} \hat{p} &= (\hat{p}_1 \quad \hat{p}_2 \quad \cdots \quad \hat{p}_n)^T \\ p_c &= (p_{c,1} \quad p_{c,2} \quad \cdots \quad p_{c,n})^T \\ \Delta p_\varphi &= (p_{\varphi,2} - p_{\varphi,1} \quad p_{\varphi,3} - p_{\varphi,2} \quad \cdots \quad p_{\varphi,n} - p_{\varphi,n-1})^T \end{aligned} \quad (4-68)$$

联合 (4-65)、(4-66) 式就可以得到基于伪距相位综合的卫星轨道改正数, 并且实现轨道改正、钟差改正的分离。

4.5 钟差改正数模型

4.5.1 基于伪距观测的等效钟差模型

基于 4.4.1 小节的讨论, 轨道径向误差不同方向造成的测距误差为厘米量级。因此, 目前北斗一期采用的一维等效钟差模型忽略了卫星星历在不同方向投影误差的影响, 任意测站对一颗卫星在频率 i 的伪距观测方程为:

$$P_i = \rho(x^{sat}) + c \cdot (dt_{rec} - dt^{sat}) + (b_{ifb} - b^{tgd}) + I_i + m \cdot ZTD + \zeta \quad (4-69)$$

式中, P_i 是伪距观测值; ρ 为星地理论距离, 受卫星轨道 x^{sat} 误差的影响; i 为频点标识; dt_{rec}, dt^{sat} 分别为测站和卫星钟差; b_{ifb}, b^{tgd} 分别为测站和卫星在 i 频点伪距的硬件延迟; I_i 为电离层延迟改正函数, 可利用双频观测数据组合消除; m 和 ZTD 为对流层投影函数以及天顶对流层延迟; ζ 包含多路径误差等噪声信息。

也即 (4-69) 式待求参数只为测站钟差以及卫星钟差。将上式简化为:

$$\Delta\rho^{sat} = \Delta t_{rec} - Pcor^{sat} \quad (4-70)$$

式中, $\Delta\rho^{sat}$ 代表伪距观测值扣除各项改正后的残差值, Δt_{rec} 、 $Pcor^{sat}$ 为待求参数, Δt_{rec} 为接收机钟差, $Pcor^{sat}$ 为卫星等效钟差。由于卫星钟差参数包含了卫星轨道误差在各站视线方向的平均误差, 因此被称为等效钟差。

目前北斗系统的广域差分处理中, 首先采用 CNMC (Code Noise and Multipath Correction) 算法 (Wu X L, 2012), 进行伪距观测数据多路径误差等观测噪声的实时修正。在此基础上利用导航电文中提供的卫星轨道、钟差以及卫星硬件延迟频间偏差参数对相关误差进行修正; 对流层的修正采用监测站实测气象参数, 结合经验的大气模型进行修正; 采用双频无电离层组合观测值消除电离层延迟。固定监测站的精确坐标, 在解算卫星等效钟差时, 固定主控站的站钟, 采用最小二乘算法实时解算其它站钟及卫星等效钟差, 最后将算出卫星等效钟差参数通过 GEO 卫星播发给差分用户使用 (陈俊平, 2017)。上述的一维等效钟差模型优点是算法简单, 计算量小, 易于程序实现, 对于实时在线系统的维护较为方便。

4.5.2 伪距相位综合的钟差改正模型

伪距相位综合的等效钟差算法第一步利用伪距解算等效钟差绝对值, 第二步通过相位差分获取等效钟差历元间变化, 第三步通过伪距相位综合解算等效钟差。

(1) 相位差分获取等效钟差历元间变化

等效钟差所采用的计算数据为监测站的伪距观测值, 其计算精度受到伪距噪声的影响。虽然 CNMC 能够减小多路径的误差, 但是该算法的有效性较大程度上依赖于相位数据的连续性。在相位观测存在新模糊度时, CNMC 需要重新收敛。为提高等效钟差的计算精度, 可以采用高精度的相位观测值。任意测站对一颗卫星的无电离层组合相位观测方程为:

$$L = \rho(x^{sat}) + c \cdot (dt_{rec} - dt^{sat}) + (B_{ifb} - B^{tgd}) + N + m \cdot ZTD + \varepsilon \quad (4-71)$$

上式中, ε 为相位观测值的噪声, B_{ifb}, B^{tgd} 分别为测站和卫星的相位硬件延迟, 通常处理中并不考虑; 其他参数与 (4-69) 式相同。与伪距相比, 相位观测

方程多了模糊度参数 N 。

采用以上观测模型，综合伪距和相位观测能够进行等效钟差的处理。相比伪距观测的数据处理，相位观测值包含了模糊度的处理。通常在实时逐历元处理模式下，模糊度的连续处理存在较长的收敛时间，此外在出现数据中断或者周跳的情况下，需要重新收敛。考虑到以上因素，在线广域差分实时处理系统没有采用相位观测值。对相邻历元的相位观测值作差分，可得到：

$$\Delta L(t_{i-1}, t_i) = \Delta\rho(x_{i-1}^{sat}, x_i^{sat}) + c \cdot (\Delta dt_{rec} - \Delta dt^{sat}) + \Delta m \cdot ZTD + \Delta\varepsilon \quad (4-72)$$

从 (4-72) 式可以看到，通过历元间差分，硬件延迟以及模糊度在历元间不变的参数得到了消除；而对流层延迟历元间的差异体现在投影函数的差异上。此外，(4-72) 式中的钟差参数变成了历元间的变化量 $\Delta dt_{rec}, \Delta dt^{sat}$ 。由于没有模糊度参数，因此以上方程解算不存在收敛性的问题。可采用与伪距一致的处理方法，获取等效钟差在历元间的高精度变化值。采用以上模型，在数据丢失或者周跳的情况下，只会影响一个历元的处理。

(2) 伪距相位综合的等效钟差模型

(4-69) 式解算的是钟差改正数绝对值，根据 (4-72) 则可以得到钟差改正数历元间的变化。定义：历元 t_i 基于伪距的等效钟差为 $x_{c,i}$ ，历元 t_i 基于相位的钟差改正数变化为 $x_{\phi,i} - x_{\phi,i-1}$ 。

在钟差改正数历元间变化结果中，只要已知其中任意一个历元的绝对值，所有与该历元一起形成连续观测的钟差改正数也就被确定，这在平差领域就归结为基准问题。与轨道求解方法一致：利用伪距的结果作为初值，当初值多于一个时，可以将伪距观测值作为虚拟观测值加权，最后采用最小二乘进行求解。将伪距结果作为实际参数的观测值，则观测方程可以写为：

$$\hat{x}_i - x_{c,i} = v_{c,i} \quad (4-73)$$

式中 \hat{x}_i 为历元 t_i 参数的真实值， $v_{c,i}$ 为残差。

基于相位的历元间差的结果同样作为虚拟观测值，观测方程可以写为：

$$(\hat{x}_i - \hat{x}_{i-1}) - (x_{\phi,i} - x_{\phi,i-1}) = v_{\Delta\phi,i} \quad (4-74)$$

式中 \hat{x}_i, \hat{x}_{i-1} 为历元 t_i, t_{i-1} 参数的真实值， $v_{\Delta\phi,i}$ 为残差。

以每个历元的方差阵 P_i 作为权阵，对处理弧段的所有 n 个历元迭加，(6)式写为法方程的形式为：

$$E^T \cdot P_c \cdot E \cdot \hat{x} = E^T \cdot P_c \cdot x_c \quad (4-75)$$

式中 E 为单位阵。(4-74) 式写为法方程的形式：

$$C^T \cdot P_\varphi \cdot C \cdot \hat{x} = C^T \cdot P_\varphi \cdot \Delta x_\varphi \quad (4-76)$$

以上 (4-75), (4-76) 式中, C 为 (4-74) 式对应的系数阵, 为:

$$C = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 1 \end{pmatrix}_{n \times n} \quad (4-77)$$

P_c 和 P_φ 为伪距和相位的分块权矩阵, 且有:

$$\begin{aligned} \hat{x} &= (\hat{x}_1 \quad \hat{x}_2 \quad \cdots \quad \hat{x}_n)^T \\ x_c &= (x_{c,1} \quad x_{c,2} \quad \cdots \quad x_{c,n})^T \\ \Delta x_\varphi &= (x_{\varphi,2} - x_{\varphi,1} \quad x_{\varphi,3} - x_{\varphi,2} \quad \cdots \quad x_{\varphi,n} - x_{\varphi,n-1})^T \end{aligned} \quad (4-78)$$

联合 (4-75), (4-76) 式就可以得到伪距相位综合的等效钟差参数。

基于非差伪距数据和相位历元间差分综合的基本思想, 本文建立了钟差改正和轨道改正统一处理的广域差分新模型。该模型利用了高精度相位观测值, 并新增了轨道改正数。

考虑到现有的用户接收机在不进行协议改造的情况下, 只能使用钟差改正数, 无法使用轨道改正数。为不影响现有用户的使用, 在利用新模型进行广域差分数据处理时, 对轨道改正数径向分量进行约束为 0, 从而得到的轨道改正数包含了轨道误差在轨道切向和法向的改正, 其表示在地固坐标系下为包含 3 维分量的改正数。同时, 钟差改正数仍然包含了轨道改正数的径向分量, 与现有等效钟差一致。此方法分离了钟差改正数与轨道改正数, 钟差改正数包含星钟预报误差以及轨道径向误差, 解算的轨道改正数为剩余的轨道误差, 具有明确的物理意义。

以上钟差改正数的用户使用方式与现有等效钟差一致, 而用户对于新增轨道改正数的使用需要更新其接收协议。

4.6 电离层格网模型

对于卫星导航定位系统而言, 电离层的影响主要表现为地面站对卫星的载波相位和伪距观测量的附加时延误差。这种时延误差会达到几十米, 严重削弱了卫星导航定位的精度和准确度, 是卫星导航定位中的主要误差源 (魏传军, 2014; Wu X L, 2014)。为了有效的消除实时导航定位中电离层误差的影响, 采用电离层延迟模型可以很好的削弱该误差的影响, 如现行的 GPS 系统广播星历中的电离层预报模型可以消除 60% 左右的延迟误差 (Blewitt, 1990; 黄兵杰, 2016),

而 WAAS (Wide Area Augmentation System) 差分系统中格网电离层模型可以消除 80%左右的电离层延迟误差 (王刚, 2000; 黄智, 2003; Prasad N, 2004; 王永澄, 1998; 詹先龙, 2012)。我国现役北斗广域差分增强系统中的电离层延迟格网改正数的计算采用的数据时监测站的伪距观测值。在大部分星基增强系统 (WAAS) 中, 电离层格网点的分辨率为 $5^\circ \times 5^\circ$ (纬度×经度), 而北斗的电离层格网点的分辨率为 $2.5^\circ \times 5^\circ$ (纬度×经度), 加密的格网点使得电离层改正值经度提高了 0.2m, 在中低纬度地区, 用户单频增强定位的三维精度提高了 1m; 在除了东北、西北监测站稀疏的其他中国区域, 电离层格网的可用性高于 95% (Wu X L, 2014)。

4.6.1 电离层格网改正模型

电离层格网确定的基本方案是利用伪距观测值提取的电离层信息构建统一的格网电离层改正模型, 顾及电离层模型的局部变化信息, 采用站际分区法, 设计电离层时延高精度修正方案, 实现电离层时延高精度修正。主要算法如下:

(1) 伪距获取电离层延迟的绝对值

对于双频 GNSS 的导航定位信号, 其两个频率上的伪距观测方程分别为:

$$\begin{cases} P_1 = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + I_{trop} + I_1 + B_1 + \varepsilon_1 \\ P_2 = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + I_{trop} + I_2 + B_2 + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (4-79)$$

式中: P_1 、 P_2 分别为两个频率上的伪距观测值, ρ 为卫星至接收机的几何距离, c 为光速, δt_r 为接收机钟差, δt^s 为卫星钟差, I_{trop} 为对流层延迟, B_1 、 B_2 分别为两个频率上卫星和接收机的系统硬件延迟, ε_1 、 ε_2 分别为两个频率上的伪距观测噪声、多路径效应、相对论效应等误差, I_1 、 I_2 分别为两个频率上的电离层延迟, 其表达式为:

$$I_i = \frac{40.28TEC}{f_i^2} \quad (4-80)$$

式中: I_i 为电离层延迟值, TEC 为斜路径总电子含量, f_i 为信号频率。

由式(4-1)和式(4-2)可以得到由双频伪距观测值计算 L_1 频率上的电离层延迟的表达式为:

$$I_1 = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \left((P_2 - P_1) - (B_2 - B_1) \right) \quad (4-81)$$

利用 (4-81) 式实时计算电离层延迟建立电离层格网时, 首先利用事先解算

的硬件延迟参数对相关误差进行改正，进而实时的利用所有伪距观测值的电离层时延值采用加权平均算法计算格网点的电离层延迟。

(2) 天顶格网电离层延迟的计算

利用上述获得的精确电离层延迟信息的基础上，采用站际分区法构建格网电离层模型，按跟踪站位置将整个服务区域分成若干子区，每个子区由一个或若干个跟踪站提供服务。进而，按就近选取原则为格网点提供电离层延迟值，构建格网电离层模型。设定服务区的若干电离层子区选择原则。

对于格网面上任一格点 j ，用其周围一定范围的穿刺点，则可实时计算其相应的电离层垂直延迟值，同时得到延迟值的误差估计。

计算方法通常采用加权插值法，计算式如下：

$$I_{IGP,v}^j = \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_{norm,j}}{I_{norm,i}} \right) \frac{W_{ij}}{\sum_{k=1}^n W_{kj}} I_{IPP,v}^i \quad (4-82)$$

式中， $I_{norm,j}$ 和 $I_{norm,i}$ 是由 Klobuchar 电离层模型估算的网格点 j 及穿刺点 i 的垂直电离层延迟； n 为参与计算的穿透点个数； $W_{ij}(W_{kj})$ 为穿透点 $i(k)$ 至网格点 j 的权。应用 Klobuchar 模型，可反映地磁经纬度及时间季节的变化对电离层变化的影响，即用一名义延迟模型将穿透点测量值运送到网格点位置，使得整个格网模型是连续的。

权 W_{ij} 一般简单地取为距离的倒数，即：

$$W_{ij} = 1/d_{ij} \quad (4-83)$$

也可结合来自平滑的电离层延迟方差估计值 σ^2 赋权，即：

$$W_{ij} = \sqrt{1/\sigma^2 + 1/d_{ij}^2} \quad (4-84)$$

式中， d_{ij} 的计算公式为：

$$d_{ij} = (r_E + h_i) \cos^{-1} [\sin \varphi_i \sin \varphi_j + \cos \varphi_i \cos \varphi_j \cos(\lambda_i - \lambda_j)] \quad (4-85)$$

其中， (φ_i, λ_i) 是穿透点 i 的纬度和经度， (φ_j, λ_j) 是网格点 j 的纬度和经度。当距离 d_{ij} 为 0，直接用该穿透点的延迟值。

(3) 格网电离层天顶改正误差 (GIVE) 的估计

网格点电离层垂直改正误差 GIVE 是广域增强系统完好性的一项重要指标，利用各穿刺点的电离层延迟误差估计值可给出其计算式如下：

$$GIVE_{IGP}^j = 1 / \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (4-86)$$

$$\varepsilon_i = I_{IPP,v}^i - \hat{I}_{IPP,v}^i \quad (4-87)$$

$$\hat{I}_{IPP,v}^i = \sum_{j=1}^n \frac{W_{ji}}{\sum_{k=1}^n W_{ki}} I_{IGP,v}^j \quad (4-88)$$

ε_i 为格网点周围的穿刺点电离层延迟误差, 表示穿刺点的实际观测的电离层垂直延迟量与格网点加权内插出的穿刺点的延迟量的差异; $I_{IPP,v}^i$ 为穿刺点实际观测的电离层垂直延迟值, $\hat{I}_{IPP,v}^i$ 为格网点加权内插出的穿刺点的延迟量。

电离层格网的确定方案流程如下图 19 所示。

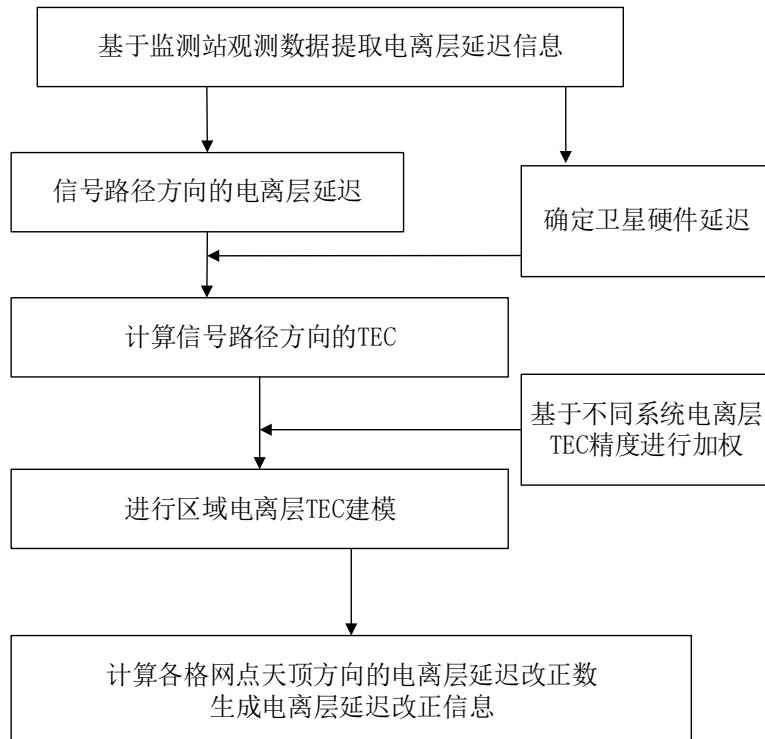


图 19 电离层格网确定方案流程图

为了提高电离层格网的可用性和精度, 可将不同系统的数据进行融合, 综合使用 GPS/北斗数据解算格网点的电离层垂直误差值。

下图表示目前区域北斗监测站监测到的北斗卫星穿刺点图, 绿色表示增加了 GPS 卫星后的穿刺点观测弧段。从图中可以看到, 穿刺点的观测个数大大增加了, 冗余数据的增加可以增加格网电离层解算的精度, 且可用的格网点数量也增加了, 这样扩大了电离层格网的服务范围。

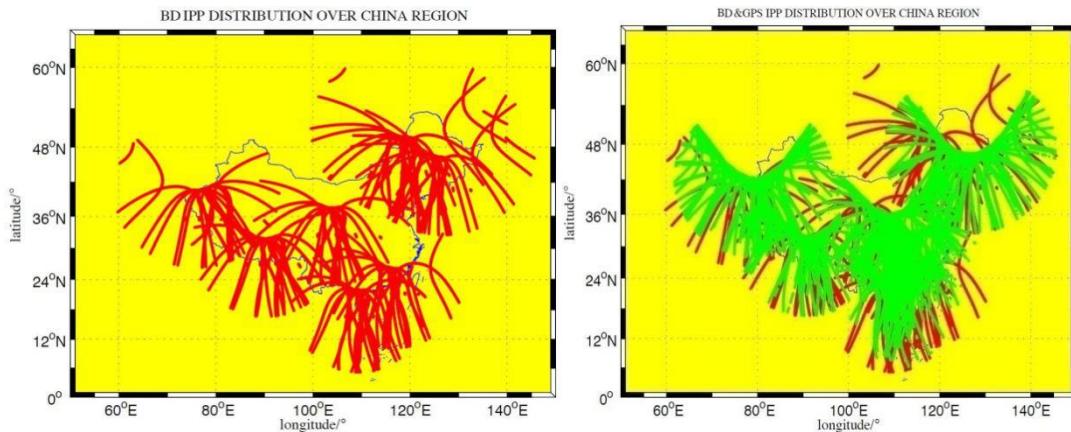


图 20 电离层穿刺点可视弧段图

4.6.2 伪距相位综合的电离层延迟解算算法

伪距相位综合的电离层延迟解算算法第一步利用伪距解算电离层延迟的绝对值，在上一小节已经介绍了；第二步通过历元间差分获取电离层延迟历元间变化；第三步通过伪距相位综合解算电离层延迟。

(1) 相位差分获取电离层延迟历元间变化

电离层延迟所采用的计算数据为观测站的伪距观测值，其计算精度受到伪距噪声的影响。虽然 CNMC 能够减小多路径的误差，但是该算法的有效性较大程度上依赖于相位数据的连续性。在相位数据观测存在新模糊度时，CNMC 需要重新收敛。为获得更高精度的电离层延迟值，可以利用高精度的相位观测值。同 (4-81) 式相似，任意测站对一颗卫星的信号传播路径上 L_i 频率上的电离层延迟，亦可由双频载波相位观测值计算得到，其表达式为：

$$I_i = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} ((\lambda_1 \varphi_1 - \lambda_2 \varphi_2) + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) - (B_2 - B_1)) \quad (4-89)$$

式中： λ_1 、 λ_2 分别为频率 L_1 、 L_2 的波长， φ_1 、 φ_2 分别为 L_1 、 L_2 上的载波相位观测值， N_1 、 N_2 分别为 φ_1 、 φ_2 的初始整周模糊度。与式 (4-81) 相比，表达式中多了模糊度参数 N_i 。

采用以上观测模型，综合伪距和相位观测能够进行电离层延迟的处理，相比伪距观测的数据处理，相位观测值包含了模糊度的处理。通常在实时逐历元处理模式下，模糊度的连续处理存在较长的收敛时间，此外在数据中断或者周跳的情况下，需要重新收敛。考虑到以上因素，对于需要实时计算发布格网电离层延迟的情况下，研究采用对相邻历元的相位观测值作差分，可得到：

$$\Delta I(t_{i-1}, t_i) = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (\lambda_1 \Delta \varphi_1(t_{i-1}, t_i) - \lambda_2 \Delta \varphi_2(t_{i-1}, t_i)) \quad (4-90)$$

由式(4-90)中可知,通过历元间差分,硬件延迟以及模糊度等在历元间不变的参数得到了消除。由于没有模糊度的参数,因此以上方程解算不存在收敛性的问题。可采用与伪距一致的处理方法,获取电离层延迟在历元间的高精度变化值。采用以上模型,在数据丢失或者周跳的情况下,只会影响一个历元的处理。本节采用MW法和无电离层残差组合法进行双频数据的实时周跳探测,具体方法参见4.3.1节。

(2) 伪距相位综合的电离层延迟计算模型

式(4-81)解算的是电离层延迟绝对值,根据式(4-90)则可以得到电离层延迟的历元间的变化。定义:历元 t_i 基于伪距的电离层延迟为 $I_{c,i}$,历元 t_i 基于相位的电离层延迟变化为 $I_{\varphi,i} - I_{\varphi,i-1}$ 。

在电离层延迟历元间变化结果中,只要已知其中任意一个历元的绝对值,所有与该历元一起形成连续观测的电离层延迟也就被确定,这在平差领域中就归结为基准问题。一种解决方法为:利用伪距的结果作为初值,当初值多余一个时,可以将伪距观测值作为虚拟观测值加权,最后采用最小二乘进行求解。将伪距结果作为实际参数的观测值,观测方程可以写为:

$$\hat{I}_i - I_{c,i} = v_{c,i} \quad (4-91)$$

式中: \hat{I}_i 为历元 t_i 参数的真实值, $v_{c,i}$ 为残差。

基于相位的历元间差分的结果同样作为虚拟观测值,观测方程可以写为:

$$(\hat{I}_i - \hat{I}_{i-1}) - (I_{\varphi,i} - I_{\varphi,i-1}) = v_{\Delta\varphi,i} \quad (4-92)$$

式中: \hat{I}_i 、 \hat{I}_{i-1} 为历元 t_i 、 t_{i-1} 参数的真实值, $v_{\Delta\varphi,i}$ 为残差。

以每个历元的方差阵 P_i 作为权阵,对处理弧段的所有 n 个历元叠加,式(4-91)写为法方程的形式为:

$$\mathbf{E}^T \mathbf{P}_c \mathbf{E} \hat{\mathbf{I}} = \mathbf{E}^T \mathbf{P}_c \mathbf{I}_c \quad (4-93)$$

式中: \mathbf{E} 为 $n \times n$ 的单位阵。式(4-18)写为法方程的形式:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P}_\varphi \mathbf{A} \hat{\mathbf{I}} = \mathbf{E}^T \mathbf{P}_\varphi \Delta \mathbf{I}_\varphi \quad (4-94)$$

在上面式(4-93)、式(4-94)中, \mathbf{A} 为式(4-92)对应的系数阵,为

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 1 \end{pmatrix}_{(n-1) \times n} \quad (4-95)$$

\mathbf{P}_c 和 \mathbf{P}_φ 为伪距和相位的分块权矩阵，且有：

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{I}} &= (\hat{I}_1 \quad \hat{I}_2 \quad \cdots \quad \hat{I}_n)^T \\ \mathbf{I}_c &= (I_{c,1} \quad I_{c,2} \quad \cdots \quad I_{c,n})^T \\ \Delta \mathbf{I}_\varphi &= (I_{\varphi,2} - I_{\varphi,1} \quad I_{\varphi,3} - I_{\varphi,2} \quad \cdots \quad I_{\varphi,n} - I_{\varphi,n-1})^T \end{aligned} \quad (4-96)$$

联合式 (4-93)、(4-94) 就能解得伪距相位综合的电离层延迟参数。而由于解得的是信号传播方向即斜路径方向的电离层延迟 I_s ，所以可以采用三角投影函数得到穿刺点处天顶方向的电离层延迟值 I_v 。其计算表达式为：

$$I_v = I_s [\cos Z'] \quad (4-97)$$

式中， Z' 为卫星在电离层星下点处的天顶距。

4.7 小结

本章主要介绍了北斗星基增强处理模型，首先讨论了观测值以及观测值误差修正模型和数据的预处理，并阐述了 WAAS 系统处理数据的流程和算法，以及北斗一期的等效钟差模型，在等效钟差模型的基础上，本论文提出了广域差分新模型。

首先分析了轨道 RTN 各分量误差对不同测站的测距影响，超过 95% 以上轨道径向误差会被钟差参数吸收，轨道径向误差在不同方向造成的测距误差在厘米量级；而卫星轨道径向垂直方向的误差在不同天底角引起的测距误差占轨道误差 dR^\perp 的比例，GEO/IGSO 卫星最大可达 15%，MEO 卫星最大可达 23%。基于以上分析，新模型增加了三维轨道改正数的求解。考虑到现有的用户接收机在不进行协议改造的情况下，只能使用钟差改正数，无法使用轨道改正数。为不影响现有用户的使用，在利用新模型进行广域差分数据处理时，对轨道改正数径向分量进行约束为 0，从而得到的轨道改正数包含了轨道误差在轨道切向和法向的改正，其表示在地固坐标系下为包含 3 维分量的改正数。此方法分离了钟差改正数与轨道改正数，钟差改正数包含星钟预报误差以及轨道径向误差，解算的轨道改正数为剩余的轨道误差，具有明确的物理意义。另外新模型增加了相位历元间差分数据的处理，避免了因相位数据周跳引起的 CNMC 重新初始化的问题。

最后介绍了北斗星基增强系统的格网电离层理论模型，在 WAAS 系统中，电离层格网点的分辨率为 $5^\circ \times 5^\circ$ （纬度×经度），而北斗的电离层格网点的分辨率为 $2.5^\circ \times 5^\circ$ （纬度×经度），加密的格网点能够提高电离层格网改正值的精度。本论文增加使用了相位数据进行解算，提高了格网电离层的精度。

5 北斗星基增强模型分析

第四章详细介绍了星基增强四维差分模型的理论模型,阐述了伪距和相位观测值,以及观测误差分析和模型改正;对数据预处理中涉及的周跳探测方法和相位平滑伪距算法做了理论说明和公式推导;简单阐述了 WAAS 的基本数据处理流程和基本模型;回顾了北斗一期星基增强系统的一维等效钟差模型,分析其优缺点;并对一维等效钟差模型进行改进,提出综合伪距、相位数据的广域差分新模型,使用了高精度的相位数据进行数据处理,并且新增了轨道改正数参数的解算,解决轨道误差在不同测站方向投影误差不同的问题。对北斗星基增强系统的电离层格网的数据处理流程和理论模型进行了说明。

本章针对北斗广域差分新模型,主要讨论星基增强模型的影响因素,以及对差分改正数的解算精度的影响进行分析。

5.1 数据及测站分布影响

利用 2016 年 4 月份的北斗观测数据,对以上广域差分新模型进行分析验证。按照北斗广域差分信息播发协议,轨道改正数的计算频度为 6 分钟,钟差改正数的计算频度为 18 秒。以下分别从观测数据采样率、监测站个数等方面对新模型进行分析。

5.1.1 数据采样率

北斗广域差分增强系统采用的观测数据为 1Hz 的高频数据,每秒计算一组等效钟差改正数,在此基础上每 18 秒根据秒秒计算的等效钟差改正数进行拟合,生成播发的等效钟差参数,按照 ICD 的规定每 18 秒播发一次(北斗 ICD 文件,2013)。基于论文提出的广域差分新模型,数据处理增加了相位观测数据的处理以及伪距相位结果的综合,因此大大增加了数据处理的计算量。为保证数据处理实时性的冗余,采用不同频率的观测数据进行处理试验,因而需要评估不同采样率数据对广域差分改正数解算精度的影响。

测站数据的采样率分别设为 1s、3s、10s 和 20s。图 21 为采用伪距观测值在不同采样率情况下新广域差分模型下卫星差分距离误差 UDRE 的 RMS 统计结果。

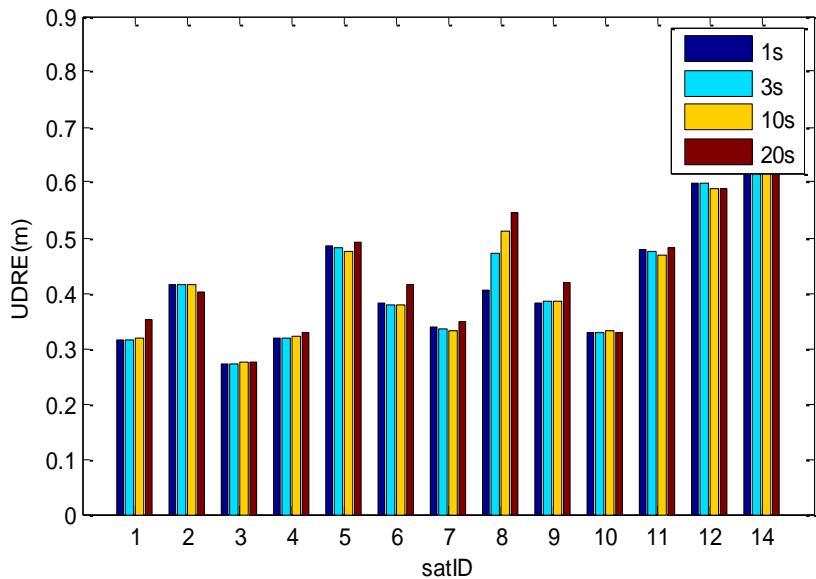


图 21 不同数据采样率北斗卫星 UDRE 的 RMS 统计图

通过图 21 的比较分析，可以看到卫星 UDRE 的 RMS 随采样率的变大而增大。当采样率在 1s、3s、10s 和 20s 时的卫星 UDRE 的 RMS 统计值分别是 0.420m、0.422m、0.422m、0.447m。可看到当采样率在 10s 以内时，与采样率为 1s 时的 UDRE 相比变化不大；从而将采样率调整为 3s 既满足了系统处理时效的要求，同时基本上不影响参数求取的精度。上图中，当数据采样率在 20s 时，解算的差分改正数的改正精度增大了约 2.5 厘米，这主要是受到采样数据量减少的影响。

5.1.2 测站个数及分布

广域差分改正数的计算中，测站分布也是影响参数计算精度的一个因素。以下分别采用 7 个、14 个、21 个测站计算广域差分改正数。参与计算验证的测站分布如下图所示，其中不同颜色的测站用于测站个数对模型参数的影响。

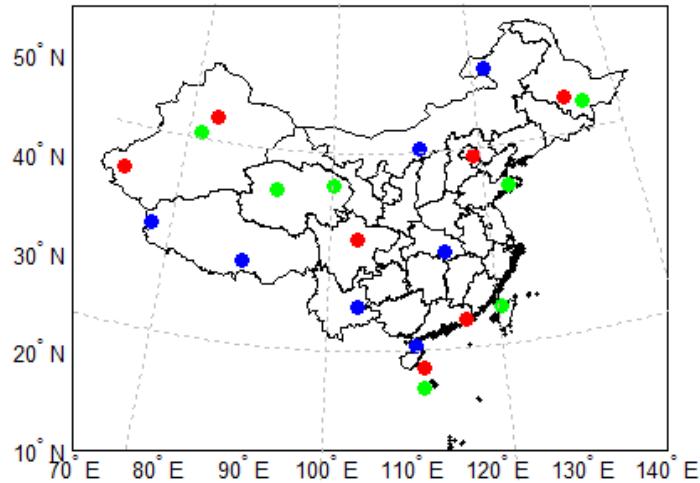


图 22 选取的北斗观测站分布

图 22 中 7 个测站为红色测站，基本上实现了的中国服务区域的整体覆盖；14 个测站的情况采用了红色和蓝色测站，在 7 个站的基础上主要在西南以及北部方向进行了补充；21 个测站则包含了图中所有测站，主要在中部以及南海进行了补充。以上测站网络中，随着测站个数增加以及观测网络的扩大，移动卫星的跟踪弧段也相应得到了延长，从而广域差分增强系统中相应卫星的可用差分服务时间也得到了增加。

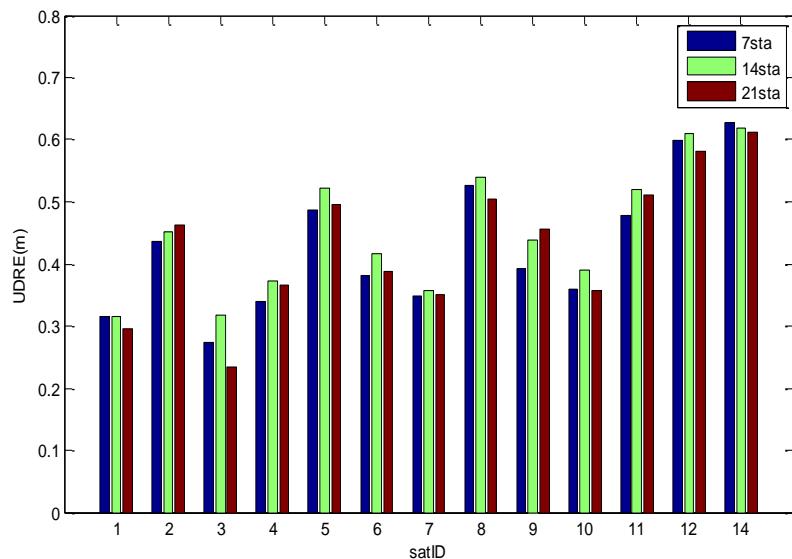


图 23 不同测站个数分布北斗卫星 UDRE 统计图

图 23 统计了使用不同测站网络进行广域差分各颗卫星 UDRE 的 RMS 统计。在以上观测网络下，北斗卫星 UDRE 的 RMS 平均值基本一致，分别为 0.449m、

0.485m、0.442m。文中的7个站是目前系统观测数据最好的测站（I类），其它测站为II类测站。不同类别的测站设备的要求不同，目前II类站的数据质量普遍低于I类站。14个站的统计结果比7个站略差的原因是有3个II类站的数据质量较差，从而导致了卫星的UDRE稍微偏大。在采用21个站的情况下也有个别星的结果变差，这也是由于测站数据质量的原因。以上表明：在相同覆盖范围的情况下，测站个数的增加对于广域差分服务精度影响不大。不过从系统服务来说，测站网络的增加对于广域差分系统的作用在于扩展差分服务的时间，增加了观测数据，从而能够提高服务的可靠性以及稳健性。

5.2 轨道模型分析

5.2.1 轨道改正数 DOP 值结果分析

第4章中已介绍了用户定位精度与DOP值和UERE的关系。DOP作为评估卫星导航性能的重要指标之一，不仅具有测量意义，还具有明确的数学意义。在GNSS用户定位中，一般用几何精度因子(Geometric Dilution Of Precision, GDOP)来衡量接收机位置与用于定位的观测卫星位置的几何关系。用户导航定位的误差一般是由接收机和用于计算定位的卫星之间的距离误差矢量被放大。因此对于单点定位和动态导航用户想要获取高精度的定位结果，可视卫星的DOP值是一个非常重要的指标。DOP值表示点位误差随卫星星座几何位置而变化的关系，确切地说，DOP为精度衰减因子或误差放大倍数，随着卫星和用户之间的相对移动在变化。

地面测站定位的观测方程为：

$$P = \sqrt{(X_r - X^s)^2 + (Y_r - Y^s)^2 + (Z_r - Z^s)^2} + c(\delta t - \delta t^s) + \Delta corr + v \quad (5-1)$$

式中， P 为伪距观测量， (X_r, Y_r, Z_r) 为待求的测站坐标， (X^s, Y^s, Z^s) 为卫星坐标， δt 为接收机钟差， δt^s 为卫星钟差， $\Delta corr$ 为观测误差延迟改正量， v 表示观测分量的残差。上式经过线性化为：

$$v = A \cdot \delta X - l \quad (5-2)$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{X_0 - X^s}{\rho} & \frac{Y_0 - Y^s}{\rho} & \frac{Z_0 - Z^s}{\rho} & 1 \end{pmatrix}, \delta X = \begin{pmatrix} \delta X_r \\ \delta Y_r \\ \delta Z_r \\ c\delta t \end{pmatrix} \quad (5-3)$$

$$l = P - \sqrt{(X_0 - X^s)^2 + (Y_0 - Y^s)^2 + (Z_0 - Z^s)^2} + c\delta t^s - \Delta corr$$

其中， (X_0, Y_0, Z_0) 为侧站坐标的初值， A 为系数项， δX 为待求参数， l 为常

数项。若观测值权阵为 P , δX 的求解方程写作:

$$\delta X = (A^T PA)^{-1} (A^T Pl) \quad (5-4)$$

可得到谐因数阵 Q

$$Q = (A^T PA)^{-1} \quad (5-5)$$

利用谐因数阵, 定义位置精度因子 PDOP 为:

$$PDOP = \sqrt{Q(1,1) + Q(2,2) + Q(3,3)} \quad (5-6)$$

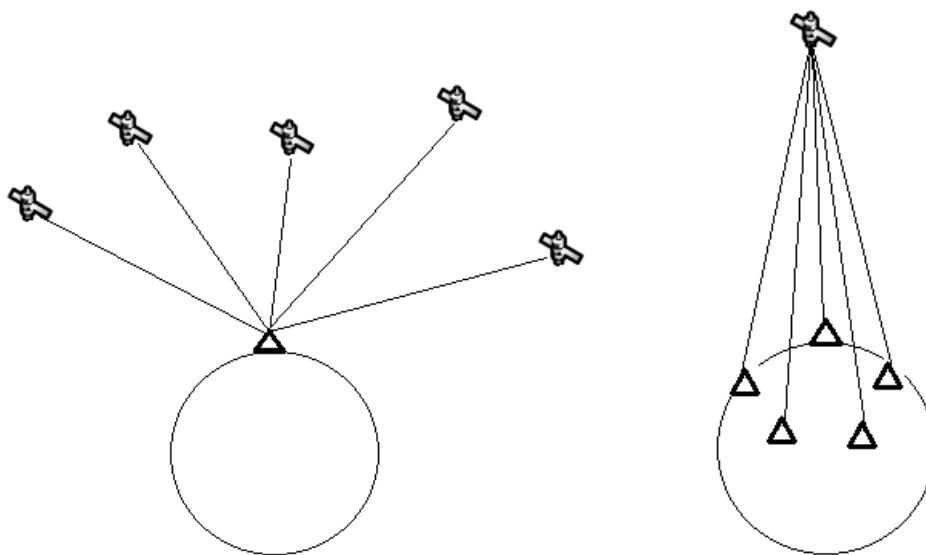


图 24 PPP 和“倒 PPP”示意图

图 24 中左图显示了地面测站利用天上卫星进行 PPP 定位的示意图。地面测站利用天上位置信息已知的导航卫星进行单点定位, 接收机根据天上卫星的几何分布, 可以求出 PDOP 值, 相对于地面测站接收机的天顶方向, 天上卫星分布均值, 因此求出的 PDOP 值较小。

图 24 中右图为天上卫星利用地面监测站求解轨道改正数的示意图。利用地面的监测站数据, 求解卫星轨道改正数的过程即是“倒 PPP”的过程。每颗卫星根据地面测站分布, 也能求取相应的 PDOP 值, 但是相对于天空中的卫星的天底方向, 地面监测站的集中分布在卫星较小的天底角范围内, 所以 PDOP 值较大。

下图为用伪距计算北斗卫星轨道改正数时的 PDOP 值结果, $dorb\ X$ 、 $dorb\ Y$ 、 $dorb\ Z$ 代表求取的三维方向的卫星轨道改正数, 横坐标轴为时间 BDT, 单位为小时 (hour), $dorb\ X$ 、 $dorb\ Y$ 、 $dorb\ Z$ 的纵坐标轴为轨道误差值, 单位为米 (m)。

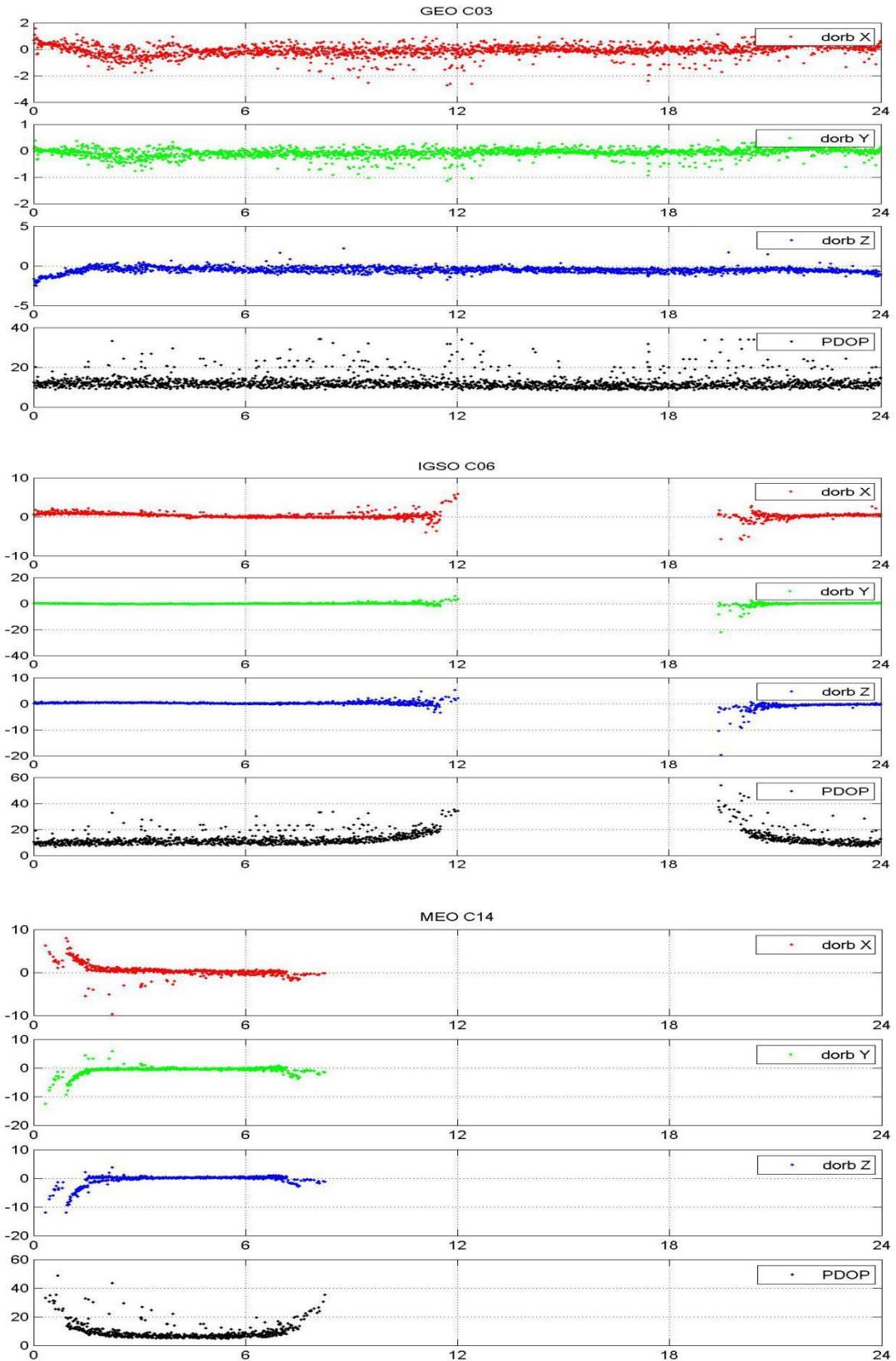


图 25 卫星轨道改正数 DOP 值时间序列 (dorb X、dorb Y、dorb Z 代表卫星轨道改正数, 横坐标轴为 BDT (hour), dorb X、dorb Y、dorb Z 的纵坐标轴单位为米)

由于 GEO 卫星在地球赤道上方位置变化范围很小，相对于地球基本是静止不动的，因此 GEO 卫星的 PDOP 值结果基本保持不变，但是由于不同 GEO 卫星所在的经度位置不同，不同 GEO 卫星的 PDOP 值也不太一样。IGSO/MEO 卫星为移动卫星，IGSO 卫星入境时间为十几个小时，而 MEO 卫星入境时间较短，只有几个小时，在卫星出入境时卫星 PDOP 会变大。因此在解算 IGSO/MEO 卫星的轨道改正数时，需要设置一些 PDOP 值的约束条件，保证轨道改正数的准确性。在北斗星基增强程序中，PDOP 设置的约束条件为移动卫星的 DOP 值小于 20，满足以上条件时，解算的轨道改正数才算有效值。

5.2.2 轨道改正数速度项影响分析

考虑到卫星轨道改正数的信息量以及星地接口的限制，轨道改正数的播发频度一般定义在 6 分钟，也即用户在 6 分钟内使用一组轨道改正数。为提高用户使用精度，可以考虑增加轨道改正数的速度项。轨道改正数的速度项表示的广播星历中轨道速度的误差，用于对更新周期内的轨道改正数进行线性建模。

卫星轨道拟合生成慢变改正信息算法如下：

在一般情况下，对于任意时刻轨道改正数 (dx, dy, dz) 与参考时刻的关系可以用线性表达式表示，即：

$$\begin{aligned} dx(t) &= dx_0 + dx_1(t - t_0) \\ dy(t) &= dy_0 + dy_1(t - t_0) \\ dz(t) &= dz_0 + dz_1(t - t_0) \end{aligned} \quad (5-7)$$

其中， dx_0, dy_0, dz_0 和 dx_1, dy_1, dz_1 分别是参考时刻 t_0 时刻的轨道改正数的常数项和速度项。

设 dx 表示轨道在 t 时刻的轨道改正数，显然，如果观测时间为 t_j ，观测误差为 v_j ，则可以建立误差方程：

$$dx(t_j) + v_j = dx_0 + dx_1(t_j - t_0) \quad (5-8)$$

设 \hat{x}_0 、 \hat{x}_1 为轨道改正数 dx_0 和 dx_1 的估计值，则有

$$\hat{x}(t_j) = \hat{x}_0 + \hat{x}_1(t_j - t_0) \quad (5-9)$$

根据最小二乘估计原则，参数 \hat{x}_0 、 \hat{x}_1 的估值可由多次轨道改正数数据求出，即

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_0 \\ \hat{x}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{j=1}^n \Delta t_j \\ \sum_{j=1}^n \Delta t_j & \sum_{j=1}^n (\Delta t_j)^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n x_j \\ \sum_{j=1}^n x_j \Delta t_j \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

其中, n 为同步观测次数, $\Delta t_j \equiv t_j - t_0$ 。

轨道改正数速度项的引入,大大增加了星地接口中的信息量。并且基于卫星动力学的原理,卫星轨道具有平缓的运动特性,计算表明北斗卫星轨道改正数速度项 3 维大约为 0.2mm/s,径向约为 0.03mm/s,转换为最大轨道误差为 3 维 7cm,径向 1cm。对比是否引入轨道改正数速度项对用户定位的影响,结果如下表。

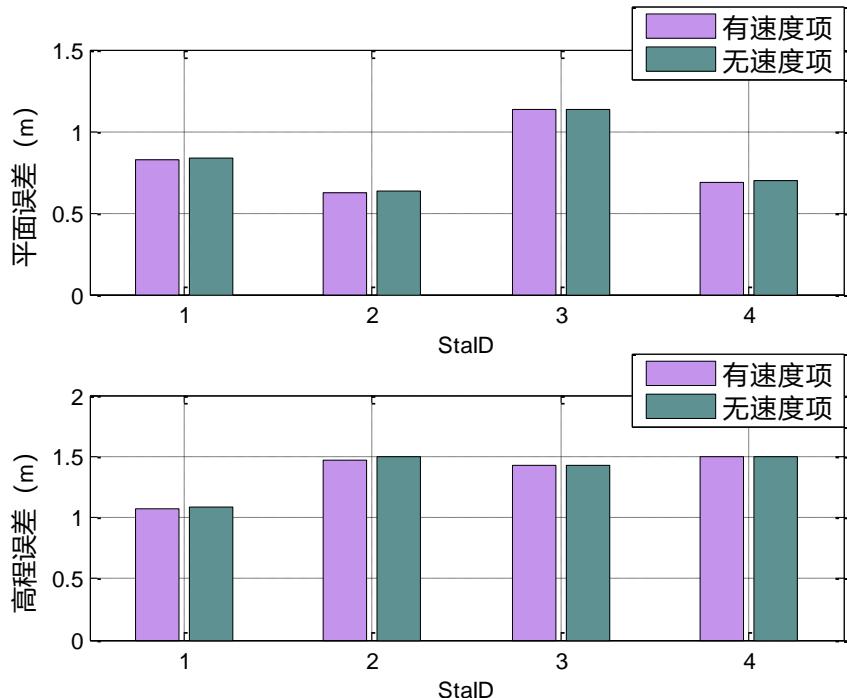


图 26 用户站差分服务下有/无轨道改正速度项的定位结果统计

表 3 用户站差分模型有/无轨道改正速度项的定位平均结果统计(m)

站号	有轨道速度项			无轨道速度项		
	东向	北向	高程	东向	北向	高程
1	0.368	0.739	1.075	0.369	0.749	1.080
2	0.343	0.522	1.466	0.342	0.531	1.492
3	0.354	1.074	1.430	0.356	1.073	1.430
4	0.422	0.546	1.492	0.424	0.547	1.493

通过表 3 的比较分析,可以看到是否引入轨道改正数速度项对用户站定位精度的影响为毫米到厘米级别,因此是否计算轨道改正数速度项对用户定位基本没有影响。

5.2.3 使用状态转移矩阵约束计算轨道改正数

本小节将讨论在星基增强系统中,利用卫星定轨中的状态转移矩阵作为约束,

来求解卫星轨道改正数。下面对卫星的状态转移矩阵进行简单的介绍。

5.2.3.1 卫星运动状态转移矩阵

卫星运动方程式是一个两阶微分方程，为了便于说明，将其改写为一阶微分方程：

$$\begin{cases} \dot{r} = v \\ \dot{v} = \ddot{r}_n + \ddot{r}_e + \ddot{r}_s + \ddot{r}_{etc} \\ \dot{p} = 0 \end{cases} \quad (5-11)$$

卫星的初始状态为：

$$\begin{cases} r|_{t_0} = r_0 \\ v|_{t_0} = \dot{r}_0 \\ p|_{t_0} = p_0 \end{cases} \quad (5-12)$$

这里：

v —卫星速度；

p —卫星运动方程中动力学待估参数，包括光压模型中的反射因子；

\ddot{r}_n —地球、月亮、太阳中心引力加速度；

\ddot{r}_e —地球非球形引力场摄动加速度；

\ddot{r}_s —太阳光压摄动加速度；

\ddot{r}_{etc} —其他摄动力。

前两式中的卫星坐标和速度均以直角坐标的形势表示在地心惯性参考系中。

在初值条件(5-12)式下积分(5-11)式便可得到卫星轨道，由于(5-12)式中含有误差，得到的轨道只是一个初步的轨道，只可作为轨道确定中的参考轨道，观测资料就是用来修正该初值，观测资料总是持续一段时间，故轨道确定中要用到的任意时刻卫星位置和速度对卫星初始状态的偏导数，即状态转移矩阵，其算法如下。

令 $x = (r, \dot{r}, p)^T$ ，对卫星运动方程在由广播星历确定的初始条件下进行数值积分就可得到卫星参考轨道 x^* 。

将卫星运动方程和初始状态可写为：

$$\begin{cases} \dot{x} = F(x, t) \\ x|_{t_0} = x_0 \end{cases} \quad (5-13)$$

对上式展开一次项，得：

$$x = x^* + \frac{\partial F(x, t)}{\partial x} \Big|_* (x - x^*) \quad (5-14)$$

其中：

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{r}}{\partial r} & \frac{\partial \dot{r}}{\partial v} & \frac{\partial \dot{r}}{\partial p} \\ \frac{\partial \dot{v}}{\partial r} & \frac{\partial \dot{v}}{\partial v} & \frac{\partial \dot{v}}{\partial p} \\ \frac{\partial p}{\partial r} & \frac{\partial p}{\partial v} & \frac{\partial p}{\partial p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & I & 0 \\ \frac{\partial \ddot{r}}{\partial r} & 0 & \frac{\partial \ddot{r}_s}{\partial p} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5-15)$$

上式第一行第一块和第三块为 3×3 的零矩阵表示卫星速度与位置和动力参数无关，第二行第二块为 3×3 的零矩阵表示卫星加速度与速度无关，第二行第三块 $\frac{\partial \ddot{r}_s}{\partial p}$ 表示卫星摄动加速度中只有光压辐射项与动力参数有关，第三行的三块均为 3×3 的零矩阵表示动力参数看作是与时间无关的参数。

令 $\delta = x - x^*$ ，则有：

$$\dot{\delta} = \left. \frac{\partial F(x, t)}{\partial x} \right|_* \delta \quad (5-16)$$

设上式的解为：

$$\delta = \Psi(t, t_0) \delta_0 \quad (5-17)$$

则有：

$$\begin{cases} \dot{\Psi}(t, t_0) = \frac{\partial F}{\partial x} \Psi(t, t_0) \\ \Psi(t_0, t_0) = I \end{cases} \quad (5-18)$$

这里的 I 为单位矩阵， $\Psi(t, t_0)$ 被称为状态转移矩阵，其内容为：

$$\Psi(t, t_0) = \begin{pmatrix} \frac{\partial r}{\partial r_0} & \frac{\partial r}{\partial \dot{r}_0} & \frac{\partial r}{\partial p} \\ \frac{\partial \dot{r}}{\partial r_0} & \frac{\partial \dot{r}}{\partial \dot{r}_0} & \frac{\partial \dot{r}}{\partial p} \\ \frac{\partial p}{\partial r_0} & \frac{\partial p}{\partial \dot{r}_0} & \frac{\partial p}{\partial p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial r}{\partial r_0} & \frac{\partial r}{\partial \dot{r}_0} & \frac{\partial r}{\partial p} \\ \frac{\partial \dot{r}}{\partial r_0} & \frac{\partial \dot{r}}{\partial \dot{r}_0} & \frac{\partial \dot{r}}{\partial p} \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix} \quad (5-19)$$

状态转移矩阵具有以下性质：

- (1) $\Psi(t, t) = I$ ；
- (2) $\Psi(t_1, t_2) = \Psi(t_1, t_3) \Psi(t_3, t_2)$ ；

根据广播星历，可用初始轨道以及动力学参数模型推导出卫星轨道任一时刻的状态转移矩阵。在轨道改正数计算过程中，可使用状态转移矩阵作为约束，在轨道改正数更新周期内，求播发的轨道改正数参数为 dX_k ，解算时刻的轨道改正数为 dX_i ，初始时刻的轨道误差为 dX_0 ，则有：

$$\frac{X_i' + dX_i}{X_0' + dX_0} = \Psi(t_i, t_0), \frac{X_k' + dX_k}{X_0' + dX_0} = \Psi(t_k, t_0) \quad (5-20)$$

$$\begin{aligned} \frac{X_i' + dX_i}{X_k' + dX_k} &= \frac{\frac{X_i' + dX_i}{X_0' + dX_0}}{\frac{X_k' + dX_k}{X_0' + dX_0}} = \frac{\Psi(t_i, t_0)}{\Psi(t_k, t_0)} \\ &= \frac{\Psi(t_i, t_0) \cdot \Psi(t_k, t_0)^{-1}}{\Psi(t_k, t_0) \cdot \Psi(t_k, t_0)^{-1}} = \Psi(t_i, t_0) \cdot \Psi(t_k, t_0)^{-1} \end{aligned} \quad (5-21)$$

$$X_i' + dX_i = \Psi(t_i, t_0) \cdot \Psi(t_k, t_0)^{-1} \cdot (X_k' + dX_k), \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (5-22)$$

对于轨道改正数解算周期内解算的轨道改正数参数，参与解算的历元的轨道改正数 dX_i 都可以通过状态转移矩阵的约束转换为 dX_k 求解。

5.2.3.2 北斗实测数据验证

有了卫星的初轨，利用动力学参数可求得卫星运动的状态转移矩阵。根据卫星的状态转移矩阵，在计算卫星轨道改正数时，使用上述状态转移矩阵作为约束条件。利用 2016 年 3 月 1 日的北斗实测数据进行验证，解算出两组轨道改正数，一组利用星基增强模型进行解算，一组增加了状态转移矩阵的约束条件进行处理，两组轨道改正数的差异结果如图 27 所示。

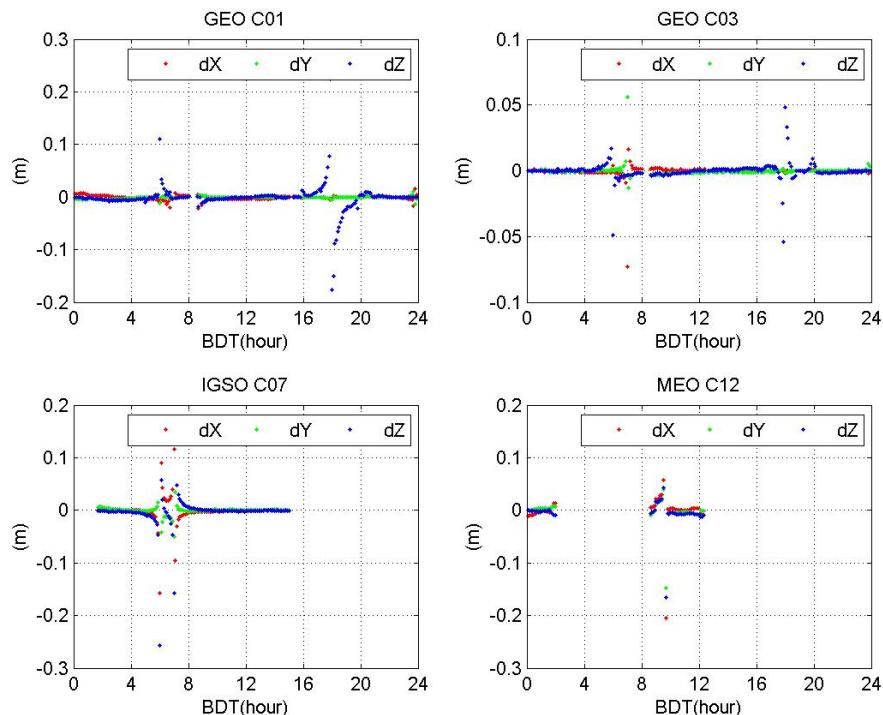


图 27 状态转移矩阵约束前后的卫星轨道改正数差异

表 4 两组轨道改正数差异统计结果(m)

卫星号	dX	dY	dZ
	rms (m)	rms (m)	rms (m)
1	0.004	0.002	0.027
2	0.012	0.030	0.031
3	0.005	0.004	0.007
4	0.072	0.083	0.103
5	0.028	0.127	0.110
6	0.022	0.018	0.032
7	0.022	0.016	0.031
8	0.008	0.040	0.026
9	0.015	0.016	0.015
10	0.043	0.025	0.048
11	0.010	0.001	0.017
12	0.037	0.027	0.031
14	0.091	0.083	0.025

图 27 中, 分别选取不同类型卫星的代表卫星的轨道改正数差异结果, 横坐标为北斗时间, 单位小时, 纵坐标表示两种模型下轨道改正数的差异, 单位为米, 图中红色、绿色、蓝色的点分别表示 X 轴、Y 轴、Z 轴的轨道改正数。可看到两种轨道改正数除了个别点, 大部分的差异都在 0 附近, 2 厘米以内。由此带来的差分用户定位的影响也在厘米量级, 可忽略不计。

5.3 钟差预报模型分析

目前北斗区域卫星导航星基增强系统播发的钟差改正数按照北斗 ICD 文件的规定, 每 18s 播发一次。由于钟差改正数的更新频率高, 为快变改正数, 考虑到卫星钟差的稳定度, 可在更新周期内对卫星钟差改正数求取平均值, 作为钟差改正数参数 $dclk$ 通过 GEO 卫星发播给用户使用:

$$dclk = \frac{\sum_{i=1}^n dclk_i}{n} \quad (5-23)$$

式中, $dclk$ 是播发给用户的钟差改正数参数, $dclk_i$ 为钟差改正数参数更新周期内计算的钟差改正数, n 为历元个数。

虽然种钟差改正数在短时间内变化量很小, 但考虑到钟差改正数预报值在 18 秒内为常数值, 精度必然有所损失, 为使精度损失达到最小, 可将更新周期

内的钟差改正数进行线性模型拟合，将 1/2 周期时刻的钟差改正数的预报值作为钟差改正数参数播发给用户使用，如图 29 所示。

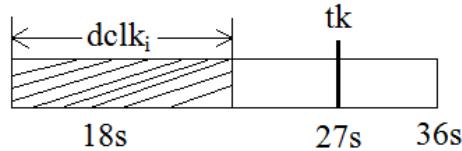


图 28 线性模型预报钟差改正数参数

使用线性模型进行钟差改正数参数预报的算法如下：

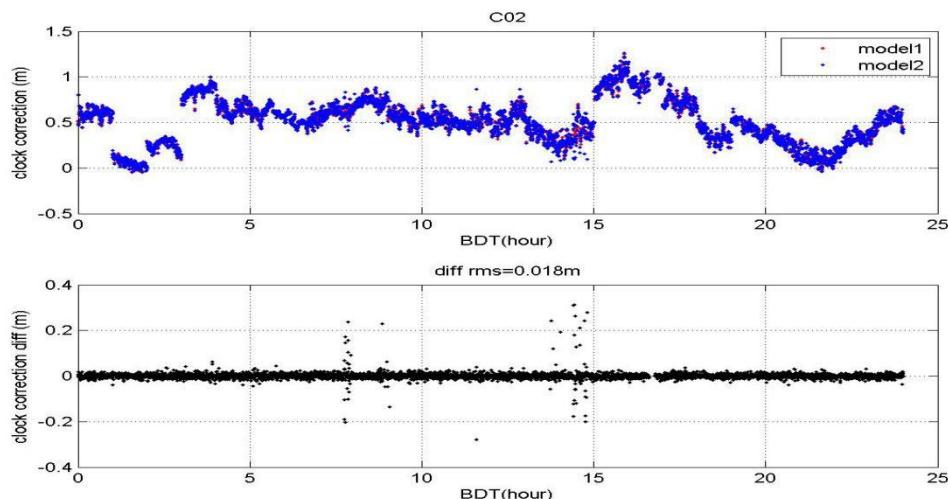
$$dclk(t) = dclk_0 + dclk_1(t - t_0) \quad (5-24)$$

上式为任意时刻钟差改正数 $dclk$ 与参考时刻的关系的线性表达式，其中， $dclk_0$ 和 $dclk_1$ 分别是参考时刻 t_0 时刻的钟差改正数的常数项和速度项，可用最小二乘法计算得出。

$$dclk = dclk_0 + dclk_1(t_k - t_0) \quad (5-25)$$

求出 1/2 周期 t_k 时刻的钟差改正数的预报值 $dclk$ ，即为发播的钟差改正数参数。

采用 2017 年 3 月 10 日的北斗观测数据，使用上述两种模型分别计算钟差改正数参数，以下讨论两种钟差改正数结果的差异以及对用户差分定位精度的影响。



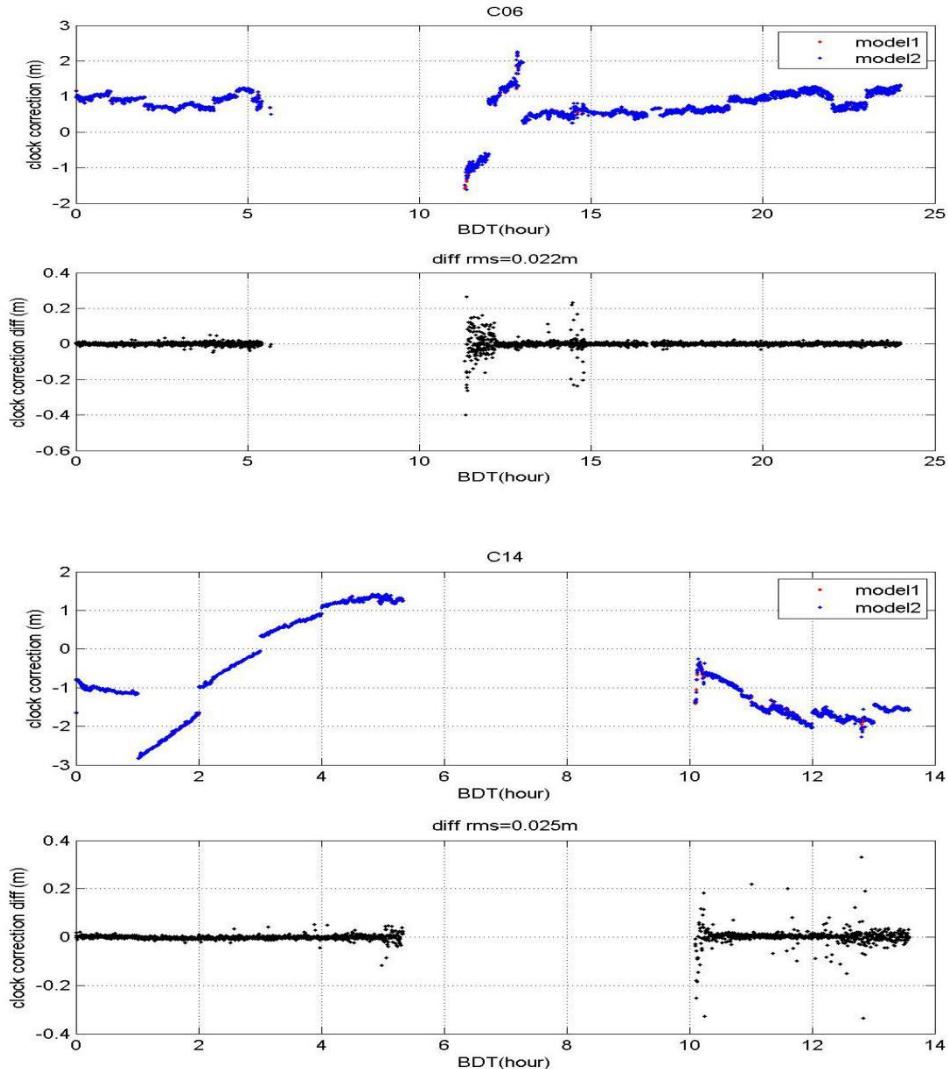


图 29 不同钟差预报模型的钟差改正数结果与差异(上部子图为两种模型计算的钟差改正数结果, model1 代表平均值计算的钟差改正数参数, model2 代表新型模型预报的钟差改正数参数; 下部子图为钟差改正数的差异)

表 5 不同钟差预报模型的钟差改正数结果差异 RMS 统计 (单位: 米)

GEO	钟差改正数 差异 RMS	IGSO	钟差改正数 差异 RMS	MEO	钟差改正数 差异 RMS
1	0.016	6	0.022	11	0.032
2	0.019	7	0.024	12	0.038
3	0.022	8	0.019	14	0.025
4	0.023	9	0.018		
5	0.015	10	0.022		
		13	0.017		
所有卫星均值					0.022

分析图 29 和表 5 的结果，使用钟差平均值预报和线性模型预报的钟差改正数参数结果相差不大，大部分结果相差都在厘米量级，所有卫星的钟差改正数的差异 RMS 平均值为 0.022m。这可能是因为卫星钟差改正数更新周期快，且星上钟差稳定度较高。

这两种不同的钟差改正数用于差分用户定位，带来的差分用户定位精度的差异也在厘米量级，因此，以上两种钟差预报模型均适用于目前的北斗星基增强系统。

5.4 伪距偏差对广域差分的影响

有国外学者研究发现，北斗卫星的伪距观测值存在米级的偏差，并与卫星高度角相关，而且 IGSO、MEO 卫星伪距偏差各不相同 (Wanninger L, 2015; Guo F, 2016)。

北斗广域差分增强系统在基本导航参数的基础上，利用服务区域内均匀分布的地面上北斗监测站数据，计算差分改正数并通过 GEO 卫星向用户发播，进行广播星历的实时修正，达到用户定位精度的增强。由于广域差分采用了伪距观测数据 (Cao Yueling, 2014)，因此，伪距偏差也将影响广域差分改正数的解算精度。

本小节根据北斗后处理精密定轨的伪距残差，研究了伪距偏差的均值、标准差的特性，并根据其特性建立了伪距偏差的模型。将模型应用到北斗广域差分计算中，并利用北斗实测数据进行验证 (Sainan Yang, 2017)。

5.4.1 北斗伪距偏差分析

我国北斗区域导航系统利用中国区域内的北斗监测站数据，实现北斗 GEO/IGSO/MEO 混合星座的动力学精密定轨，轨道的内符精度优于 1 米，径向内符精度优于 0.2 米 (Tang C, 2016)。北斗系统后处理精密定轨采用的主要配置如表 6 (Tang C, 2016)。

表 6 北斗精密定轨解算策略

名称	模型
观测数据弧长	3 天
数据采样率	60 秒
估计光压模型	T20 光压模型的尺度因子、Y-bias
经验参数	轨道 T/N 方向的 cos 经验加速度
对流层延迟	4 小时估计一次

钟差估计 权重比	固定主控站站钟 伪距/相位 (1/10000)
-------------	----------------------------

北斗精密定轨处理后，能够获得卫星精密轨道和钟差，同时也能得到每个测站的伪距残差。伪距残差包含了多路径、接收机通道时延以及噪声等的影响。我们利用 1 个月的北斗精密定轨的伪距残差，分析了伪距偏差的均值、标准差的特性。

采用 2016 年 DOY 316-345 天的北斗精密定轨处理后的伪距偏差结果，分析了伪距偏差长期的均值、标准差结果。图 30 显示了其中 CDJL 测站的每天统计的伪距偏差均值、标准差序列图，从中可以发现不同卫星的伪距偏差的均值较为稳定，且存在明显的差异。标准差长期内较为稳定。大多数卫星伪距偏差的标准差是稳定的，但是 MEO 卫星的标准差变化较为明显，存在 7 天的周期，这是由于 MEO 卫星相对于地面站的运动轨迹周期为 7 天，伪距偏差标准差变化可能是由 MEO 出入境弧段长度不同引起的。

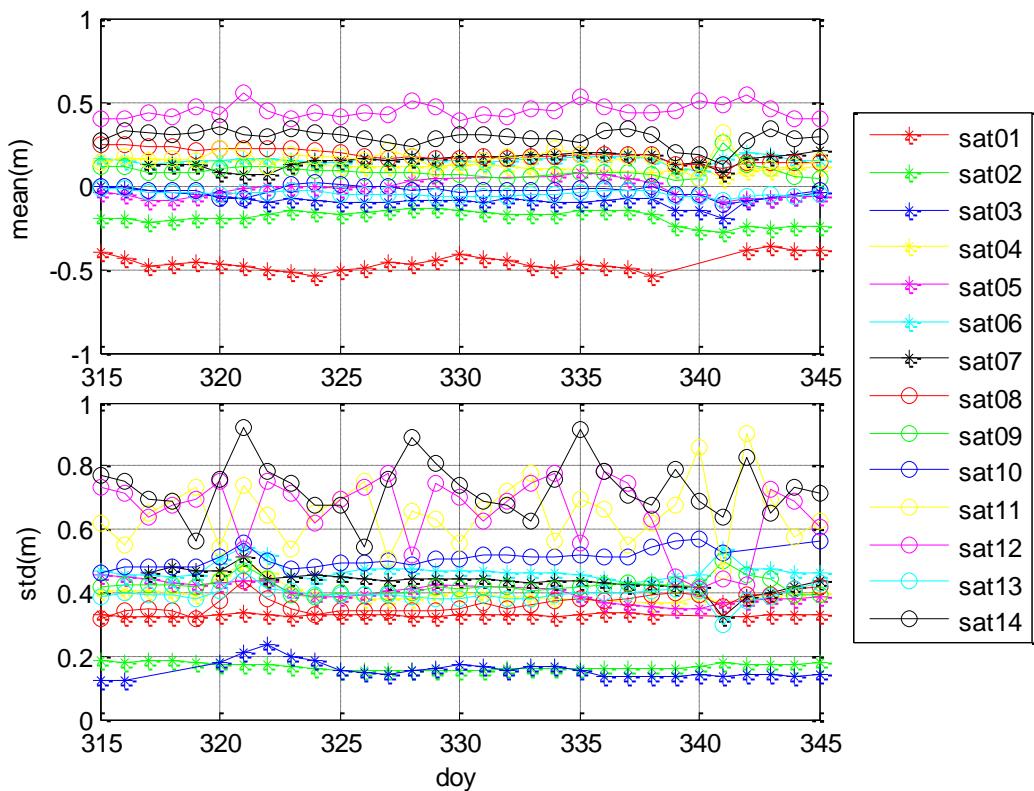


图 30 北斗精密定轨的伪距偏差单天的均值、标准差序列图

下图表示了测站 BJDN 对 GEO-02、IGSO-06 和 MEO-14 卫星 1 个月的伪距残差变化情况。

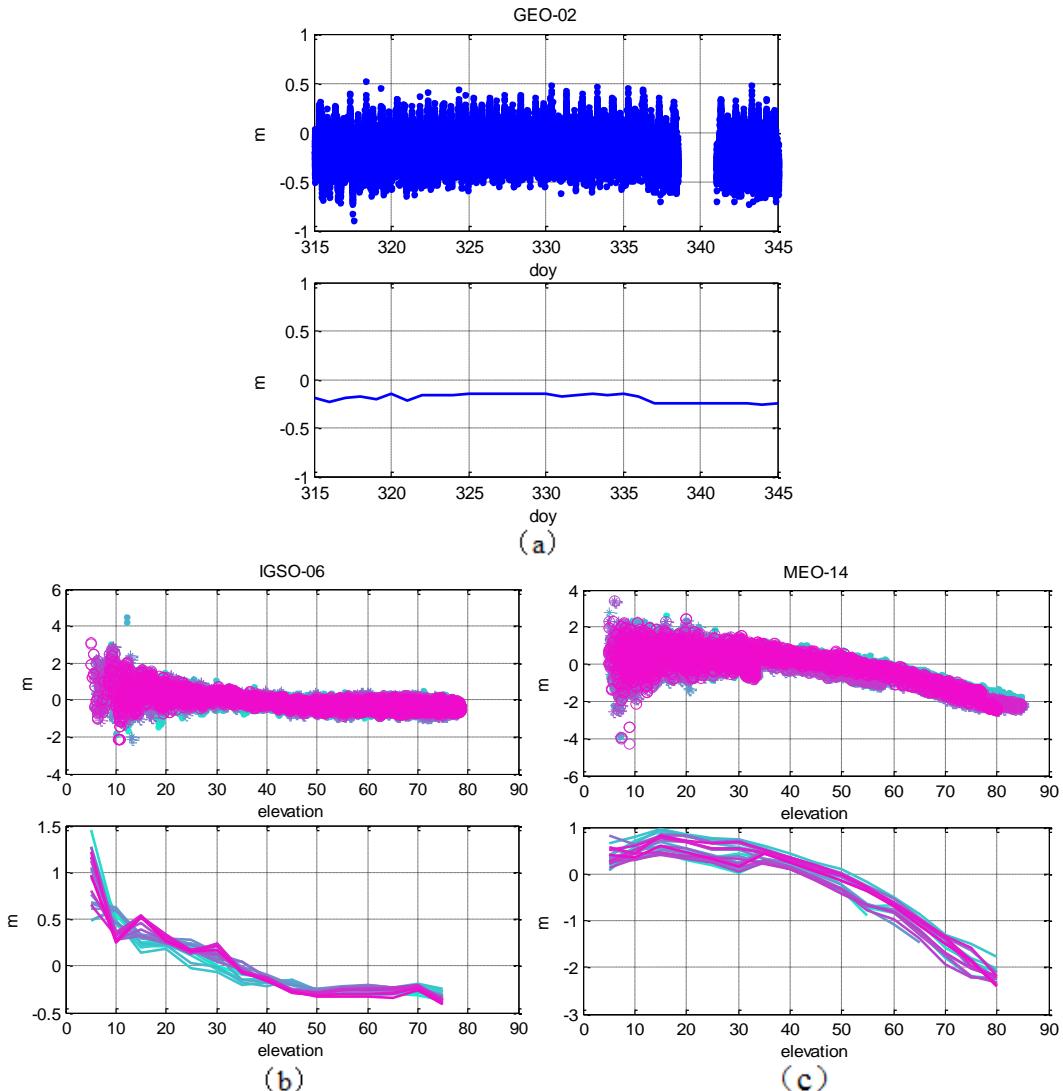


图 31 北斗 GEO-02、IGSO-06、MEO-14 卫星 1 个月的伪距残差变化情况 (a 中, 横轴为时间 DOY, 上图为 GEO-02 的伪距残差序列图; b 和 c 中, 横轴为卫星高度角, 上图为 IGSO-06、MEO-14 的伪距残差结果, 下图为伪距残差平滑的结果, 图中不同颜色代表不同天的结果)

图 31 中 GEO 卫星的高度角相对地面测站基本没有变化, 图 (a) 中列出了 1 个月每天的伪距残差时间序列图, 并按天进行平滑, 图 (a) 中数据缺失的时间为卫星发生机动的时间; 图 (b) 和图 (c) 将 IGSO/MEO 卫星的原始残差以及按照高度角平滑后的残差表示成随高度角变化的序列。分析发现: 卫星每天的伪距偏差具有很好的重复性; IGSO/MEO 在卫星高度角小于 30 度的时候, 卫星伪距偏差较大, 且伴随较大的噪声, 出现一定幅度的抖动; 并且 IGSO/MEO 卫星随着高度角变大, 伪距噪声减小, 但是伪距偏差仍然存在, 并与卫星高度角存在一定的相关性。

进一步分析不同类型卫星的伪距偏差, 下图给出了 BJDN 测站 2016 年

DOY345 对所有卫星伪距偏差变化的情况。分析发现：不同的 GEO 卫星伪距偏差存在差异；同一类型 MEO 卫星以及 IGSO 卫星伪距偏差较为一致；IGSO 与 MEO 卫星的伪距偏差量级上存在差异，当卫星高度角较低时，北斗卫星伪距偏差能达到 1m 左右；而卫星高度角达到 90 度时，IGSO 卫星伪距偏差在 0 ~ -0.5m 之间，MEO 卫星伪距偏差能达到 -2m 的振幅。导致这一差异的原因可能是卫星的物理结构不同以及卫星的轨道高度不同引起的。

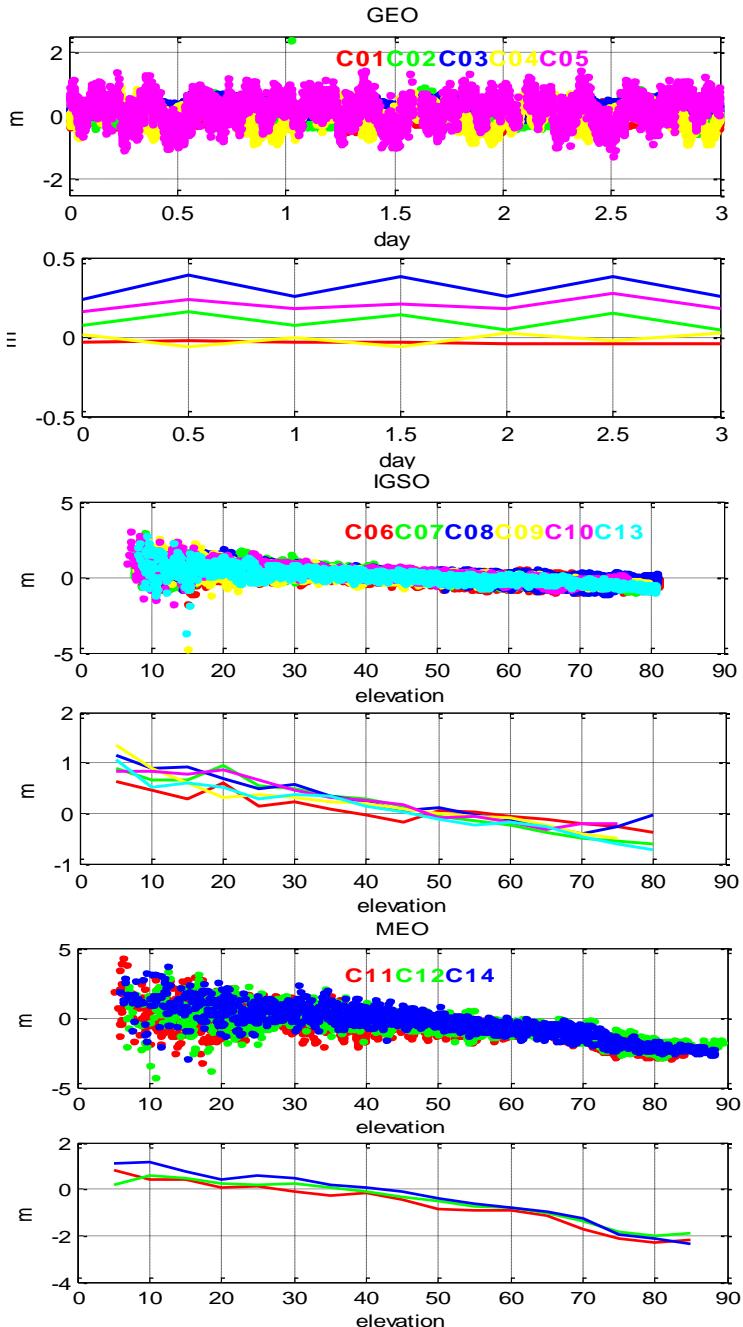


图 32 北斗精密定轨的不同类型卫星的伪距偏差结果（GEO 卫星，横轴为天，定轨弧长为 3 天；IGSO/MEO 卫星，横轴为卫星高度角；图中不同颜色代表了不同卫星的结果）

5.4.2 北斗伪距偏差建模

北斗广域差分是利用中国区域内均匀分布测站的实时观测伪距数据，计算出广域差分改正数播发给用户使用，达到用户增强的目的。根据以上对北斗伪距偏差的分析，同一测站对各颗卫星存在着各不相同的伪距偏差，这些偏差不会被站钟吸收；并且不同测站对同一颗卫星的伪距偏差也存在差异，这些偏差也不会被星钟吸收。因此以上伪距偏差将影响广域差分改正数的解算精度。

根据 GEO 卫星相对于地面站高度角变化范围小、伪距偏差均值长期稳定的特点，建立常数项伪距偏差模型，如 (5-26) 式所示，式中 i 表示卫星编号， C_i 是待估计的常数项改正值。

$$CodeBias_{GEO} = C_i \quad (i=1,2,3,4,5) \quad (5-26)$$

由于 IGSO/MEO 卫星的伪距偏差值与卫星高度角存在相关性，因此将 IGSO/MEO 卫星的伪距偏差表示成与卫星高度角相关的分段线性函数模型，如 (5-27) 式所示，式中 ele 表示卫星的高度角， j 代表卫星高度角的索引， C_j 为常数改正值， a_j, k_j 是待估计的模型参数。

$$CodeBias_{IGSO/MEO} = \begin{cases} C_j & (j < 5) \\ a_j + k_j \cdot (ele - ele_j) & (j = 5, 10, \dots, 85) \\ C_j & (j > 85) \end{cases} \quad (5-27)$$

该模型可提供给用户定位使用，用户使用时依据卫星高度角进行线性内插。

表 7 北斗伪距偏差分段线性模型

卫星号	GEO		IGSO		MEO	
	偏差值	高度角	偏差值	高度角	偏差值	
1	-0.052	5	0.838	5	0.753	
2	0.096	10	0.523	10	0.488	
3	0.271	15	0.425	15	0.539	
4	-0.008	20	0.410	20	0.418	
5	0.176	25	0.355	25	0.453	
		30	0.295	30	0.357	
		35	0.162	35	0.097	
		40	0.065	40	0.049	
		45	-0.094	45	-0.107	
		50	-0.206	50	-0.435	
		55	-0.216	55	-0.705	
		60	-0.282	60	-0.825	
		65	-0.313	65	-1.010	

70	-0.394	70	-1.507
75	-0.413	75	-1.821
80	-0.475	80	-2.121
85	-0.665	85	-2.113

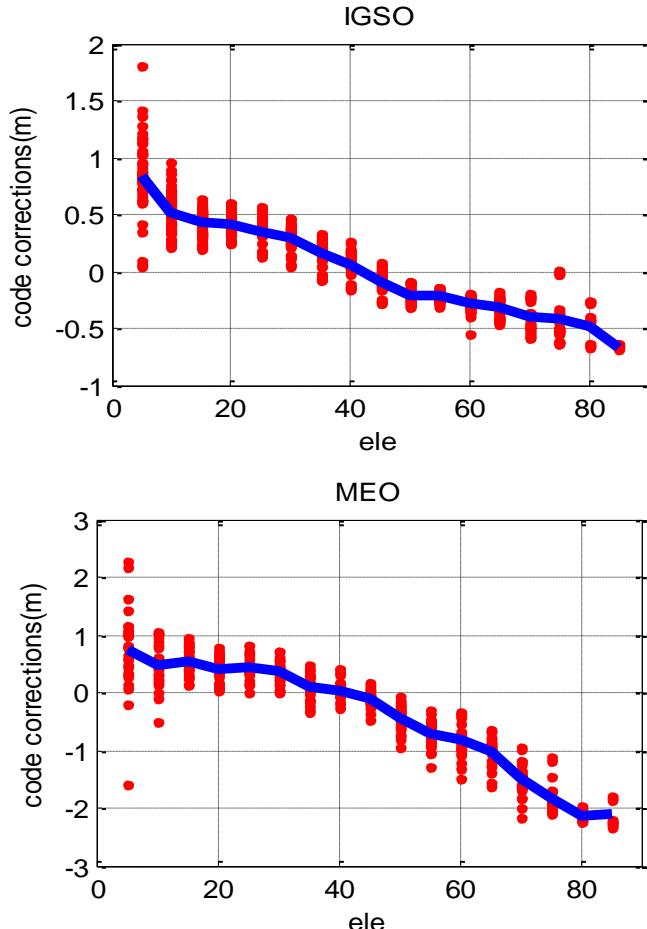


图 33 IGSO/MEO 卫星高度角结点的伪距偏差结果（横轴为卫星高度角，蓝色表示结点处的伪距偏差综合值，红色表示每颗卫星在结点处单天的伪距偏差值）

利用以上数据建立北斗卫星伪距偏差模型，得出每颗 GEO 卫星的伪距偏差常数值以及 IGSO/MEO 卫星伪距偏差在每个高度角结点的值如表 7 所示。图 33 表示了北斗 IGSO/MEO 卫星伪距偏差在高度角结点的值，蓝色表示伪距偏差综合值，红色表示每颗卫星在结点处单天的伪距偏差值。

5.4.3 北斗实测数据验证

根据以上建立的北斗伪距偏差修正模型，将其应用于北斗广域差分改正数计算中，利用实测北斗观测数据，分析伪距偏差模型的改正效果。广域差分数据处理时，固定一个测站的站钟，计算得到等效钟差改正数。在误差改正中，除了扣

除对流层、固体潮、相对论、卫星和接收机天线相位中心改正之外[8]，还采用以上模型进行伪距偏差改正。

采用 2016 年 DOY 346 的数据进行验证，计算修正北斗伪距偏差前后的两组等效钟差改正数，分析伪距偏差对差分改正数的影响，并从差分改正数的服务精度进一步验证，包括 UDRE 以及用户的增强定位结果。

下图显示了未修正伪距偏差和修正伪距偏差的等效钟差结果，分别选取 1 颗 GEO、IGSO、MEO 卫星分析，发现 GEO 卫星修正伪距偏差前后的等效钟差变化较小，引起的差异在 2dm 以内。而 IGSO、MEO 卫星的等效钟差变化较大，尤其卫星在卫星出入境时等效钟差的差异接近 1m。表 8 给出了每颗卫星在修正伪距偏差前后等效钟差差异统计的 RMS 值，可看到 IGSO/MEO 卫星的差异比 GEO 卫星的差异大。

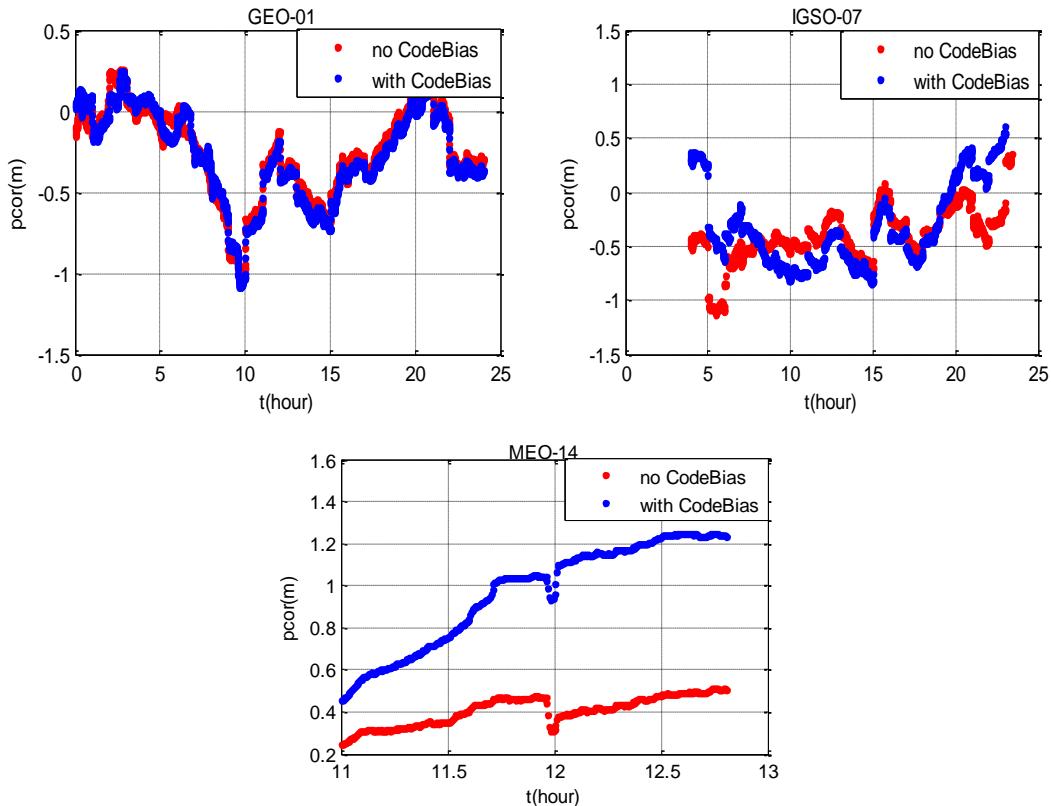


图 34 1、7、14 号卫星修正伪距偏差前后的卫星等效钟差结果

表 8 修正伪距偏差前后的卫星等效钟差差异

satID	RMS(m)	satID	RMS(m)
1	0.066	8	0.336
2	0.044	9	0.337
3	0.029	10	0.34
4	0.022	11	0.332
5	0.135	12	0.327

6	0.35	13	0.34
7	0.356	14	0.59

修正北斗伪距偏差前后的两组等效钟差结果存在一定差异，差分改正数的服务精度也会产生差异。比较应用北斗伪距偏差模型前后的卫星 UDRE 的情况，如图 35 和表 9 所示。

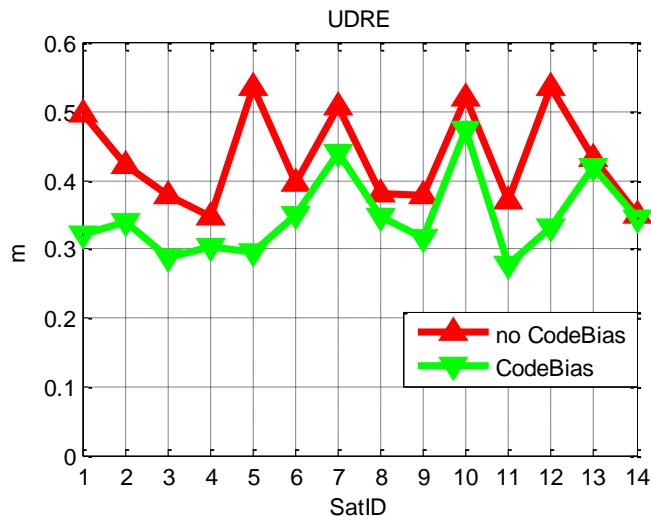


图 35 修正伪距偏差前后北斗卫星 UDRE

表 9 修正伪距偏差前后的北斗卫星 UDRE 统计结果

satID	UDRE	UDRE(CodeBias)	satID	UDRE	UDRE(CodeBias)
1	0.50	0.32	10	0.52	0.48
2	0.42	0.34	11	0.37	0.28
3	0.38	0.29	12	0.54	0.33
4	0.35	0.30	13	0.43	0.42
5	0.54	0.30	14	0.35	0.35
6	0.40	0.35	GEO	0.44	0.31
7	0.51	0.44	IGSO	0.44	0.39
8	0.38	0.35	MEO	0.42	0.32
9	0.38	0.32	Mean	0.43	0.35

上图中，卫星编号 1-5 为 GEO 卫星，6-10、13 为 IGSO 卫星，11-12、14 为 MEO 卫星。修正北斗伪距偏差后，GEO 卫星 UDRE 由 0.44m 提升到 0.31m，IGSO 卫星由 0.44m 提升到 0.39m，MEO 卫星由 0.42m 提升到 0.32m，所有卫星的 UDRE 都得到了提升。

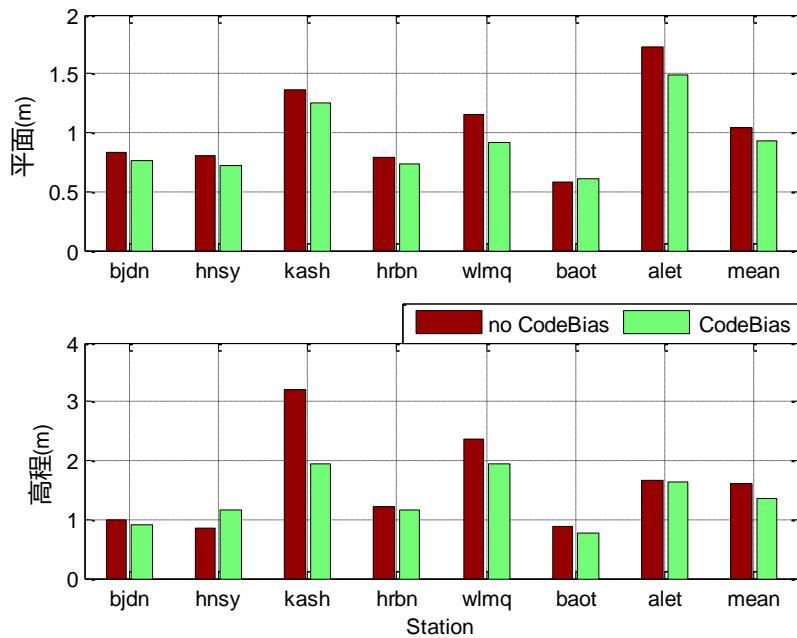


图 36 测站双频伪距动态增强定位结果比较

表 10 测站双频伪距动态增强定位平均统计结果(m)

	未修正 CodeBias	修正 CodeBias	提升 百分比
平面	1.036	0.926	10.63%
高程	1.597	1.364	14.59%

基于以上分析结果, 利用 2016 年 DOY 346 的北斗数据, 分别使用两组等效钟差改正数进行用户双频伪距动态增强定位的试验, 定位计算中对流层、固体潮、相对论、卫星和接收机天线相位中心改正等采用模型计算扣除。在使用修正北斗伪距偏差计算的等效钟差改正数时, 用户站也配合使用北斗伪距偏差模型, 下图为用户定位的两组结果。图 36 中, 两个子图分别显示了不同测站在水平、高程方向的定位结果的统计情况。使用北斗伪距偏差模型后, 用户增强定位的在水平、高程方向均有提高, 水平由 1.04m 提升到 0.93m, 高程由 1.6m 提升到 1.36m, 分别提高了 10.6% 和 14.6%。

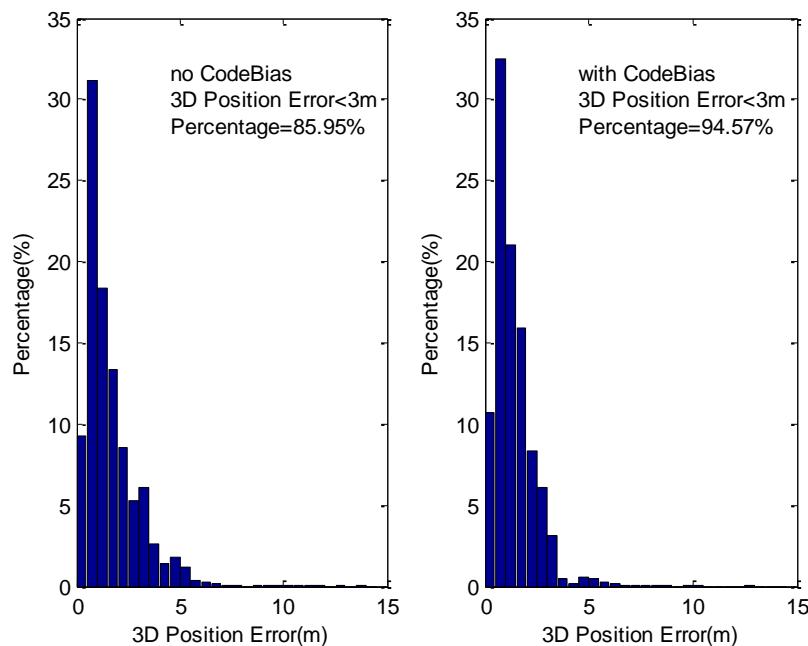


图 37 用户增强定位误差分布直方图比较

图 37 将以上测站双频伪距动态增强定位的误差结果进行直方图统计，可以看到定位误差大于 5m 的结果变少了，且定位误差小于 3m 的百分比由 85.9% 提高到 94.5%，提高了用户定位精度的同时，保证了用户定位的可靠性。

5.5 对流层延迟修正误差影响分析

在第 4 章已详细介绍了对流层延迟的成因以及对流层的修正模型和映射函数，本小结将讨论对流层延迟对星基增强性能的影响。

5.5.1 对流层延迟量误差分析

在星基增强数据处理中，监测站可以实时测量测站上的气象数据（温度、湿度和气压），利用监测站上的气象数据及相应的对流层修正模型计算测距信号的对流层延迟改正。气象传统模型，例如传统的 Hopfield、Saastamoinen、Black 等模型（Hopfield H S, 1969; Black H D, 1978; Saastamoinen J, 1973），模型计算时利用测站实测气象数据，改正精度可达厘米或分米级（姚宜斌, 2013,2015）。天顶对流层延迟可根据成因进一步分为天顶静力学延迟（Zenith Hydrostatic Delay, ZHD）和天顶非静力学延迟又称为湿延迟（Zenith Wet Delay, ZWD）。通过模型计算对流层天顶延迟引起的厘米或分米级的误差，通过映射函数投影到

斜路径上，会将误差放大。

在北斗精密定轨数据处理中，将对流层延迟当成未知参数处理（Tang C, 2016）。利用精密定轨数据处理得到的对流层结果，评估模型利用实测气象数据计算的对流层延迟的误差。

采取 2016 年 7 月 10 日的实测北斗观测数据，利用北斗精密定轨解算得到的对流层结果与对流层模型利用实测气象数据计算得到的对流层延迟进行比较，分别选取一颗静地卫星和移动卫星的结果。

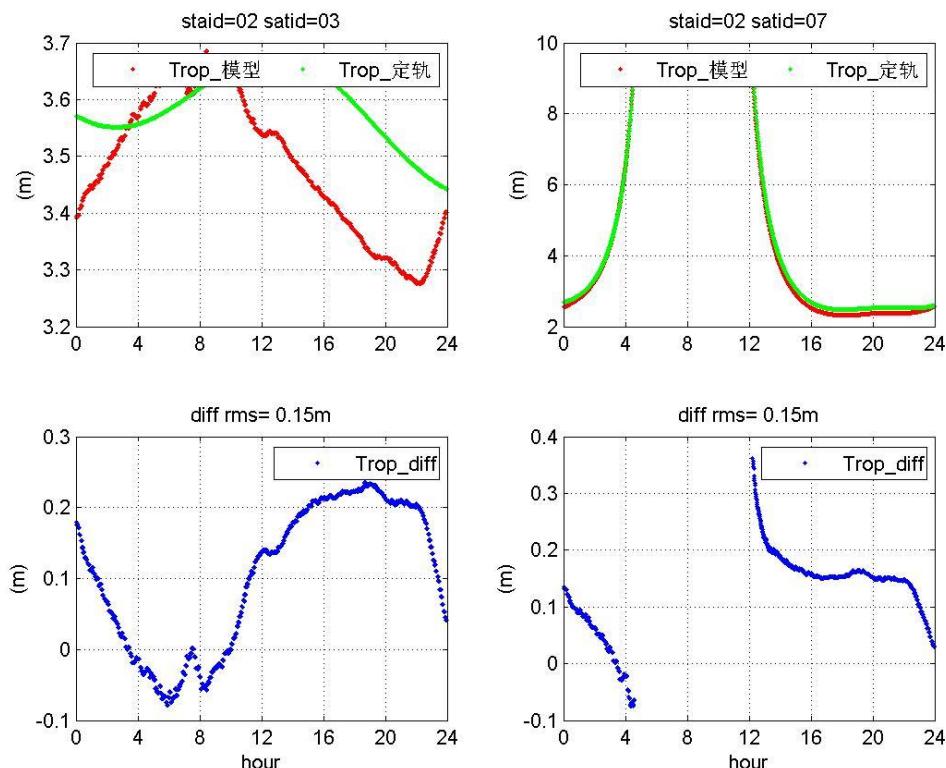


图 38 2 号测站斜路径对流层延迟差异

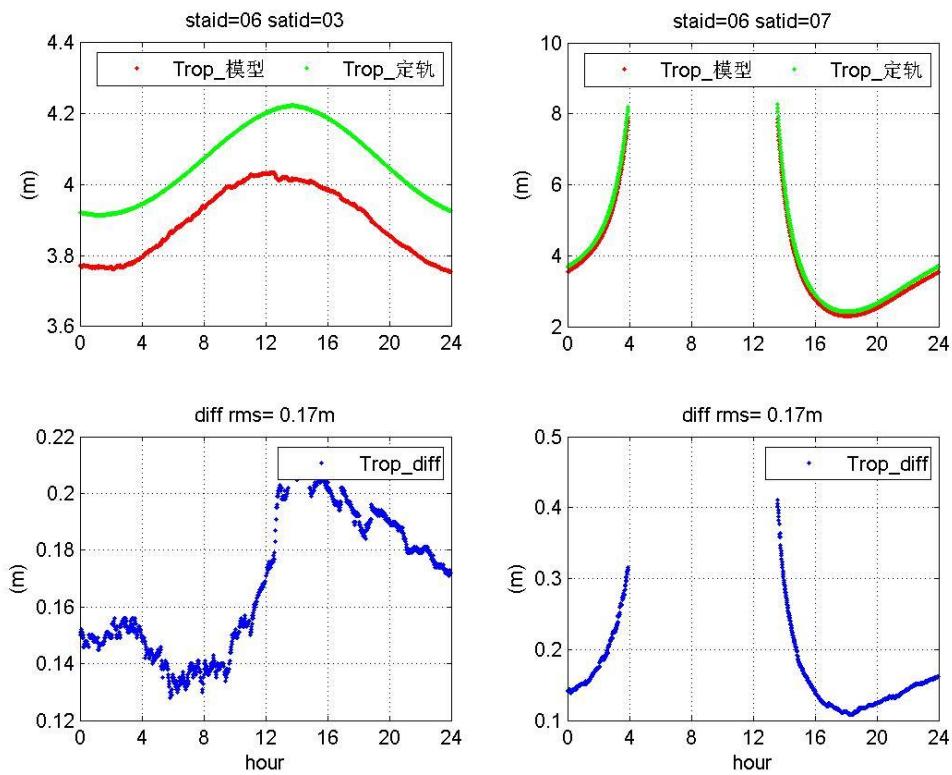


图 39 6 号测站斜路径对流层延迟差异

图 38、39 中，分别显示了 2 号测站和 6 号测站 3、7 号卫星的模型计算的对流层误差，X 轴表示北斗时，单位是小时；在上部子图中，Y 轴表示斜路径对流层延迟，单位是米，红色、绿色曲线分表代表模型利用气象数据计算的对流延迟、精密定轨得到的对流层延迟；下部子图中，Y 轴显示了两种对流层延迟的差异，单位为米。由于移动卫星存在出入境时高度角很低，很明显得看到对流层延迟误差随着高度角变小而变大。总体来说，模型计算的斜路径对流层延迟精度在分米量级。

5.5.2 对流层延迟处理

将北斗精密定轨得到的对流层结果，应用于北斗星基增强数据处理中，其他解算策略保持不变，研究对流层延迟误差对星基增强性能的影响。

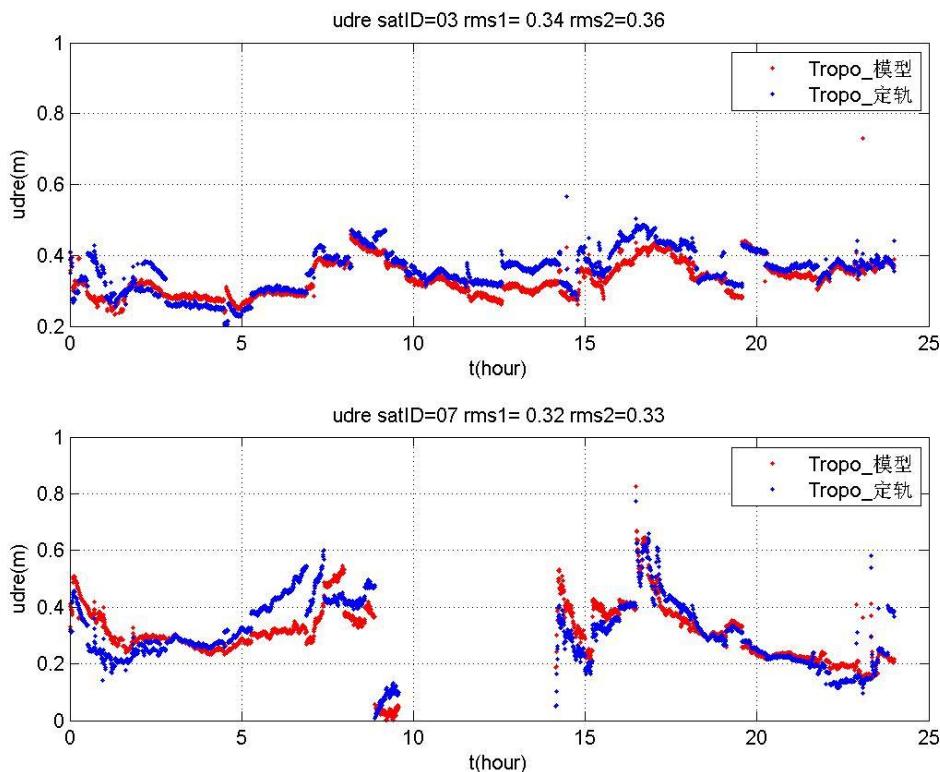


图 40 2 种不同对流层延迟计算的卫星 UDRE

图 40 中显示了 2 种不同对流层延迟计算的卫星 UDRE 的结果，横坐标表示北斗时，单位为小时，纵坐标表示卫星 UDRE，单位为米。红色曲线代表使用实测气象数计算的差分改正数的 UDRE 结果，蓝色曲线代表使用精密定轨的对流层解算结果计算的差分改正数的 UDRE 结果。可以看到使用 2 种不同的对流层延迟计算得到的卫星 UDRE 结果差不多，相差几个厘米。虽然 2 种对流层延迟的差异在分米量级，但是不同对流层延迟计算的差分改正数的 UDRE 精度相当，因为对流层延迟的差异已被钟差轨道改正数吸收，各自产品之间是自洽的。

5.6 小结

本章对星基增强模型进行了详细的探讨，分别从以下方面进行分析，并通过实测数据进行验证，得到一些结论：

- 1、从观测数据采样率、参与解算的监测站的个数分布等角度对模型进行了研究，根据实测数据解算结果，当数据采样率在 1s、3s、10s 和 20s 的时候，随着数据采样率的增加，卫星 UDRE 基本上随采样率的变大而增大，当采样率小于 10s 时，UDRE 基本没影响；选取分布较为均匀的测站，用少量的测站就可以实现星基增强的效果。

2、分别对均值预报和线性模型预报，两种钟差预报模型进行评估，发现两种钟差预报得到的钟差改正数参数相差厘米量级，相应的在差分用户定位精度影响为 cm，可忽略不计。

3、分析卫星轨道改正数的 PDOP 值，由于地面测站相对于天上卫星几何构型较为集中，PDOP 值较大，因此在解算轨道改正数时，设置合理的 PDOP 约束条件：当移动卫星的 DOP 值小于 20，解算的轨道改正数才算有效值。对轨道改正数速度项进行分析，发现引入轨道改正数速度项对用户站定位精度的影响为毫米到厘米级别，可忽略不计。

4、利用卫星的初轨以及动力学模型得到卫星的状态转移矩阵，以此最为约束条件，解算卫星的轨道改正数。发现约束前后轨道改正数的值变化不大，且不同条件下的轨道改正数用于用户差分定位的精度相当。

5、通过对长期的北斗精密定轨后的伪距残差结果进行分析，发现北斗伪距偏差的特性，GEO 卫星的伪距偏差是长期稳定的，IGSO/MEO 卫星的伪距偏差与高度角相关，且两组卫星类型的伪距偏差存在差异。根据分析结果，为不同类型的卫星建立北斗伪距偏差修正模型，并将模型应用到北斗广域差分计算中。利用北斗实测数据进行验证，分析北斗伪距偏差模型的应用效果。结果表明，使用北斗伪距偏差模型后，UDRE 以及用户增强定位精度都得到提升，卫星 UDRE 由 0.43m 提升到 0.35m，用户增强定位水平和高程分别提高了 10.6% 和 14.6%。

6、对模型计算的对流层延迟量精度进行评估，发现模型计算的对流层延迟精度在分米量级，但是使用 2 种不同的对流层延迟计算得到的卫星 UDRE 结果相差几个厘米，因为对流层延迟的差异已被钟差轨道改正数吸收，各自产品之间是自治的。

6 北斗星基增强试验与评估

使用第四章介绍的误差修正模型，采用北斗实测数据，对本文提出的伪距相位综合的星基增强模型进行试验分析。星基增强试验重点在于，针对等效钟差模型、伪距相位综合的广域差分模型 2 种模型进行比较比较，分析钟差轨道改正数的性能；研究北斗电离层格网的结果，并评估单频差分用户定位的性能。

而用户对于系统的需求不仅要求精度高，且服务稳定，因此有必要对北斗星基增强系统进行精度评估。本文会根据两个重要的指标：空间信号精度、系统服务（差分用户定位）精度，来评估北斗星基增强系统精度。在进行系统精度评估时，性能指标的评估大多基于实测数据进行的，为了得到比较合理的评估结果，往往需要对大量实测数据进行统计分析。

6.1 钟差轨道改正数

针对北斗一期星基增强的一维等效钟差模型，本论文提出的综合伪距相位的星基增强差分模型，针对等效钟差改正数只能修正卫星钟差和轨道径向误差，忽略轨道切向、法向误差在测站投影误差的问题，本文提出的差分模型新增了三维轨道改正数参数的解算，且增加使用了相位历元间差分数据获取差分改正数的高精度变化值，平滑伪距计算的差分改正数。本小节选用 2016 年 4 月 8 日-2016 年 4 月 17 日 10 天的北斗观测数据，主要讨论卫星钟差、轨道改正数的结果，以及等效钟差模型、综合伪距相位的新模型两种差分模型的改正数精度和差分用户定位精度。

6.1.1 钟差轨道改正数结果

图 41 表示了 2016 年 4 月 8 日采用监测站实测北斗数据计算的 3 号、7 号卫星差分改正数结果时间序列。上部子图中红色曲线为伪距数据解算的等效卫星钟差结果，蓝色曲线为综合伪距相位数据解算的卫星钟差结果，下部子图为新模型中解算的卫星轨道改正数。可看到伪距解算的等效钟差结果包含了伪距噪声，而伪距相位综合解算的等效钟差更为平滑，减少了伪距噪声的影响。图 4 也可以看到，在广播星历更新的时候，卫星钟差会发生分米级甚至米级的跳变，这是由于相邻的两条卫星广播星历轨道、钟差预报误差跳变引起的；而卫星的轨道误差改正数变化较为平稳，在广播星历更新后变化较小。同时，IGSO、MEO 移动卫星在出入境时，受到观测几何条件的影响，轨道误差改正数会出现较大的噪声。

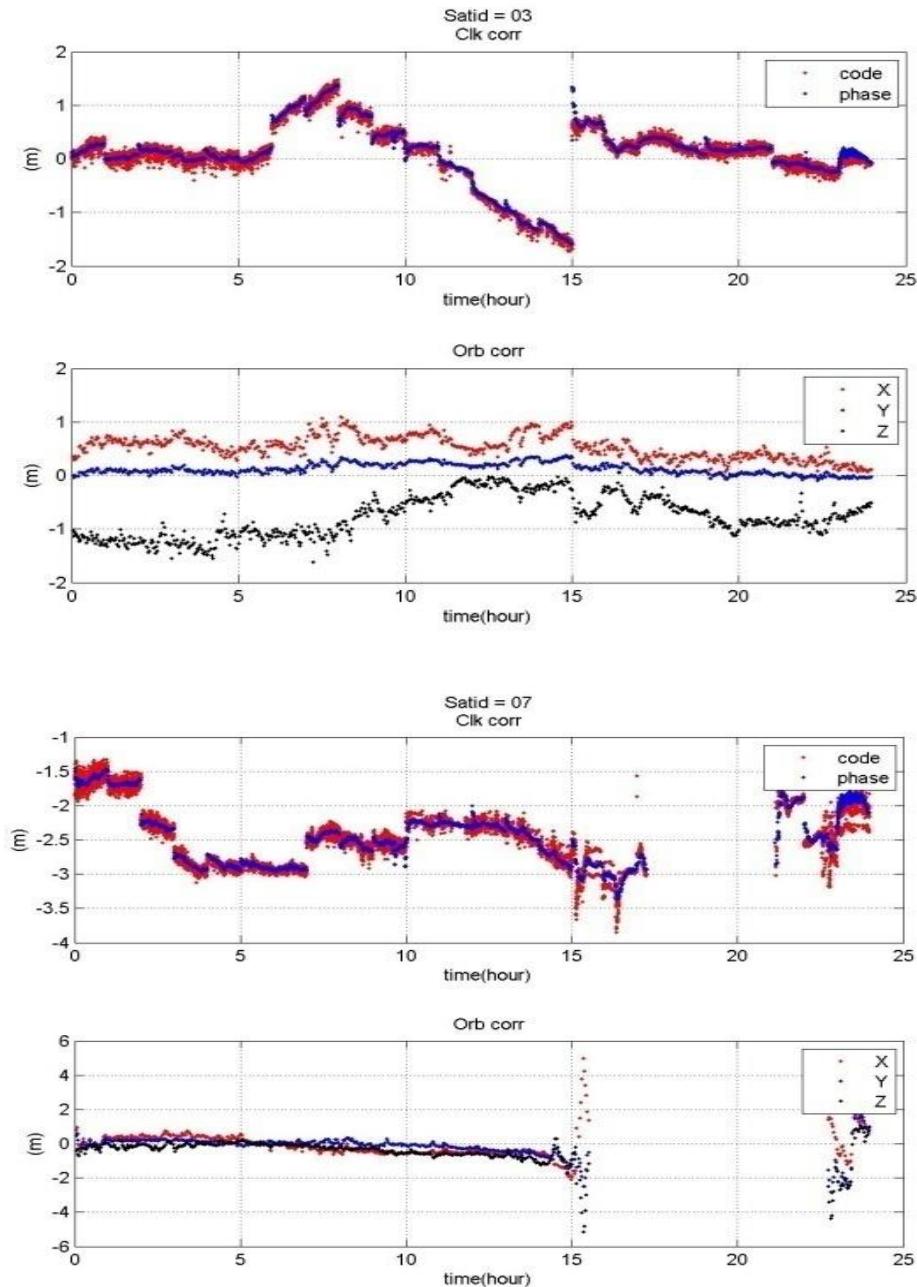


图 41 3 号、7 号卫星差分改正数时间序列图

6.1.2 钟差轨道改正数结果精度分析

为分析伪距相位观测综合的广域差分新模型的精度，首先比较现有基于伪距等效钟差模型以及新模型广域差分增强系统的卫星 UDRE 的结果，如图 42 所示。

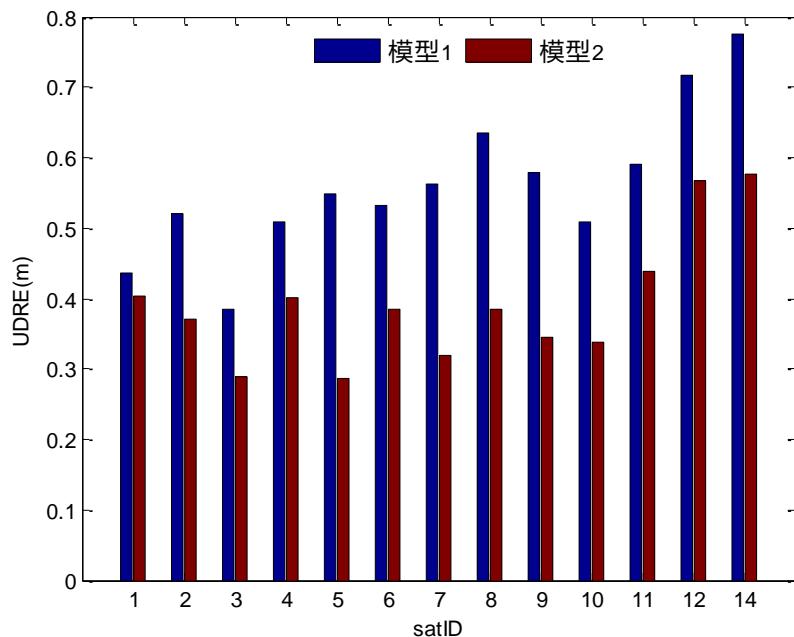


图 42 2016 年 4 月 8 日-2016 年 4 月 17 日各颗卫星 UDRE 结果统计

图 42 中，卫星编号 1-5 为 GEO 卫星，6-10 为 IGSO 卫星，11-14 为 MEO 卫星；模型 1 代表等效钟差模型，模型 2 代表综合伪距相位的新模型。对于 GEO 卫星，模型 1 平均 UDRE 为 0.48m，模型 2 平均 UDRE 为 0.35m，提高百分比为 27%；对于 IGSO 卫星，模型 1 平均 UDRE 为 0.56m，模型 2 平均 UDRE 为 0.36m，提高百分比为 35%；对于 MEO 卫星，模型 1 平均 UDRE 为 0.69m，模型 2 平均 UDRE 为 0.52m，提高百分比为 24%。

MEO 移动卫星的 UDRE 结果较大，原因是 MEO 卫星入境弧度过短，入境过程中 CNMC 伪距中残余的多路径误差以及出入境时几何构型差影响了差分改正数的精度。以上结果表明综合伪距相位的广域差分模型能显著改善卫星 UDRE。

6.1.3 双频用户差分定位精度分析

基于以上分析的结果，利用 2016 年 4 月 8 日-2016 年 4 月 17 日 10 天的实测数据进行伪距相位综合的广域差分新模型下系统的服务精度的评估。比较了基于伪距等效钟差模型以及新模型的广域差分服务系统，测站伪距双频动态定位的结果。定位计算中对流层、固体潮、相对论、卫星和接收机天线相位中心改正等采用模型计算扣除。

统计动态坐标与精确坐标的差异，下图表示了中国国土范围内 8 个测站在测站站心地平坐标系中东西、南北及高程方向的定位精度(RMS)。模型 1 代表等效钟差模型，模型 2 代表综合伪距相位的广域差分新模型。所选测站坐标已精密测

定，位置精度优于 5 厘米，可以作为准确值用于评估区域卫星导航系统的定位误差。

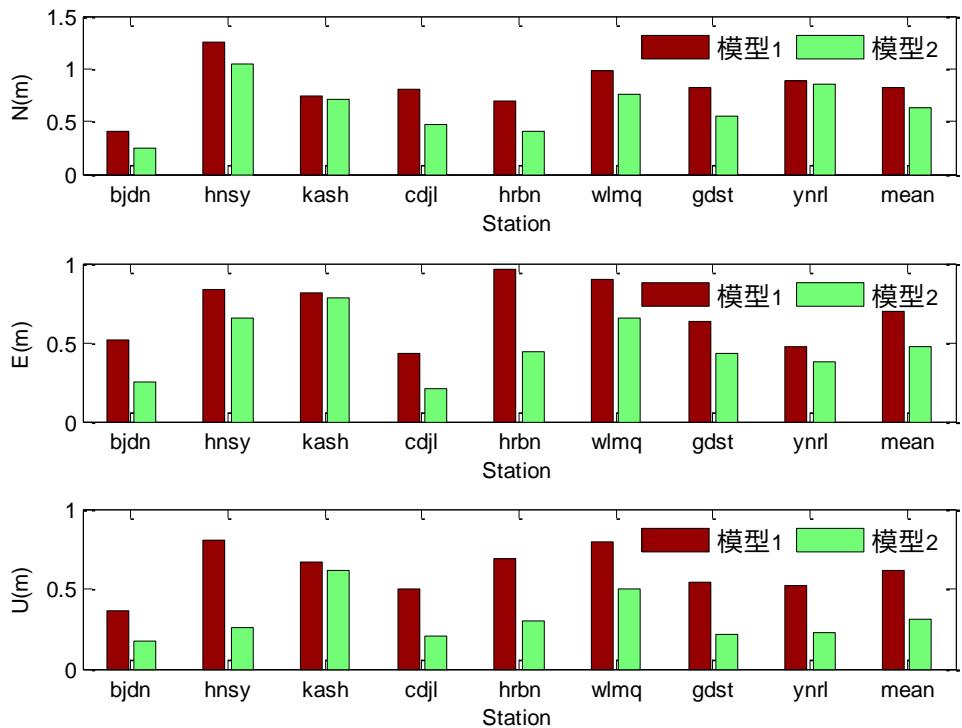


图 43 2016 年 4 月 8 日-2016 年 4 月 17 日用户站差分服务下定位结果统计

表 11 用户站 2 种差分模型定位平均结果统计(m)

	N	E	U	3D
模型 1	0.82	0.69	0.65	1.17
模型 2	0.63	0.47	0.31	0.85
提升比率(%)	23	32	52	27

图 43 中，三个子图分别显示了不同测站在南北、东西、高程方向 10 天定位结果的统计情况。两种差分服务下用户定位三维精度分别达到了 1.17m 和 0.85m。对于不同测站，增强服务下模型 2 相对于模型 1，用户定位精度在南北、东西，特别是高程方向，都得到了显著提高。根据表 11 中不同测站的定位统计结果，基于本文提出的新广域差分模型，双频用户伪距定位在南北、东西、高程方向的定位精度分别提升了 23%，32% 和 52%。测站三维定位精度由 1.17m 提升到 0.85 m，提高 27%。

6.2 电离层格网改正数

6.2.1 电离层格网改正数结果

图 44 为 2016 年 4 月 8 日计算的中国区域电离层格网点的电离层改正值，图中格网点上的数值为垂直电离层延迟量，红色的点为电离层穿刺点。图中可看到中国的西南、东北以及北部地区部分格网点没有垂直电离层延迟量的结果，由于上述地区的监测站分布比较稀疏，导致这部分区域的穿刺点个数比较少，所以这些格网点目前无法输出垂直电离层延迟量。解决这一问题的方法是，增加这些地区的测站的建设，补充电离层穿刺点个数。

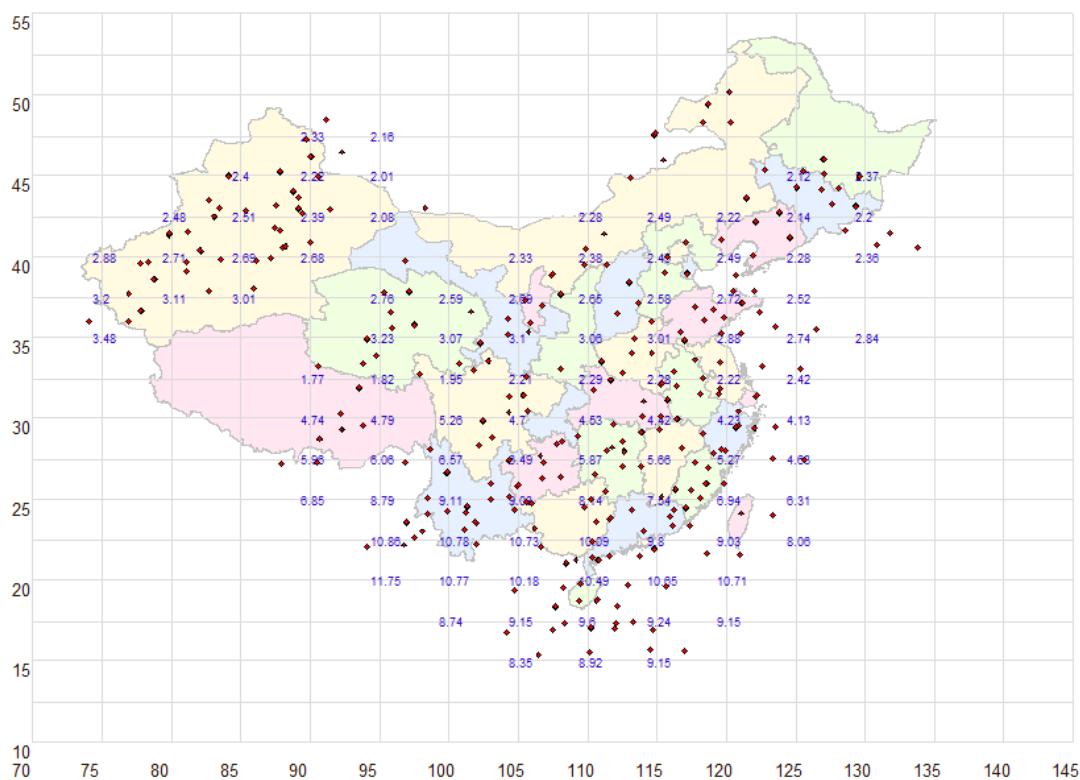


图 44 格网电离层北斗数据计算结果

6.2.2 单频用户差分定位结果

利用 2016 年 4 月 8-17 日的北斗观测数据，使用广播星历和轨道、钟差改正数，电离层延迟采用电离层格网点进行修正。将每天测站单频差分定位的结果做 rms 值的统计，并将 10 天的统计结果作平均，评估单频差分用户定位的精度结果。

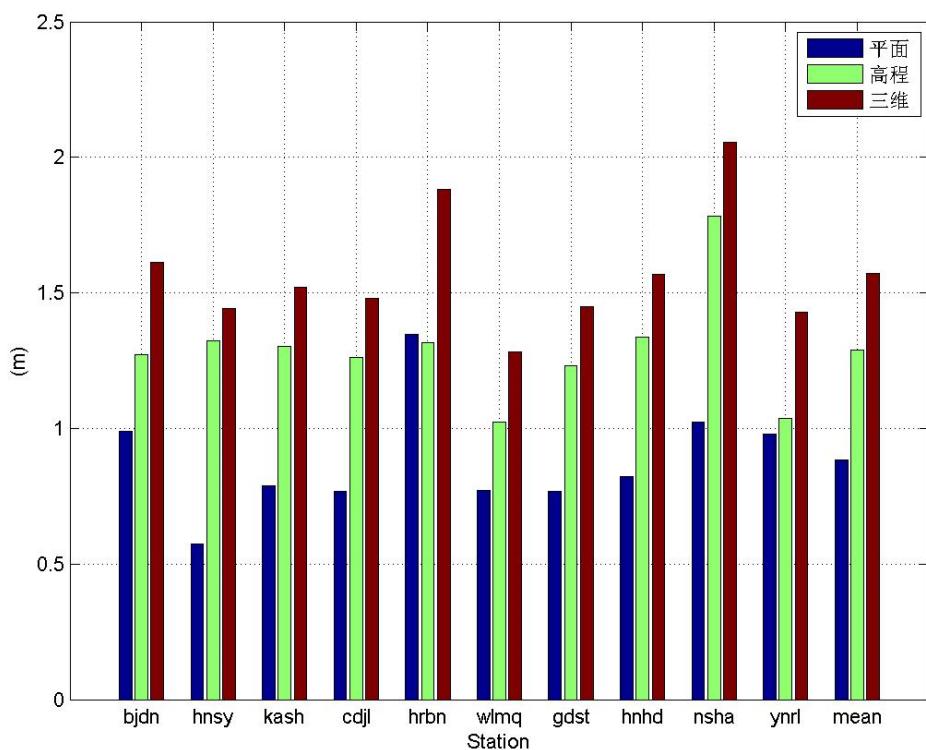


图 45 单频用户差分定位结果

表 12 单频用户差分定位平均结果统计(m)

测站	平面 (m)	高程 (m)	三维 (m)
bjdn	0.99	1.27	1.61
hnsy	0.57	1.30	1.44
kash	0.78	1.30	1.52
cdjl	0.76	1.26	1.47
hrbn	1.34	1.31	1.88
wlmq	0.77	1.02	1.28
gdst	0.76	1.23	1.45
hnhd	0.82	1.33	1.56
nsha	1.02	1.78	2.05
ynrl	0.98	1.03	1.42
mean	0.88	1.28	1.57

图 45 中，显示了中国不同地理位置的测站的单频用户差分定位结果，横坐标为不同测站，纵坐标表示定位误差，单位是米，蓝色、绿色、红色分别表示定位的平面、高程、三维误差。大部分测站水平定位精度在 1m 以内，高程在 1.5m 以内，除了 hrbn 测站水平精度为 1.3m，nsha 测站高程精度为 1.7m，原因为 hrbn

测站位于中国的东北，nhai 测站位于中国南海区域，电离层穿刺点较少，电离层格网精度不高，导致定位精度较差。根据以上测站定位结果，北斗星基曾强单频差分用户平均定位精度，平面/高程/三维精度分别为为 0.88/1.28/1.57m。

6.3 北斗星基增强系统空间信号精度评估

卫星导航定位系统的主要功能是为用户提供定位于导航服务，而用户的定位导航精度与卫星信号精度以及卫星空间几何分布相关，可用 $Pos_{error} = UERE \times DOP$ 表达，在第四章中已经详细介绍了。UERE 主要与空间信号的用户距离误差 URE 和用户设备误差 UEE 有关，DOP 值与空间卫星几何分布有关。其中与北斗系统控制段相关的是空间信号精度，卫星空间信号精度仅与卫星的星钟和轨道有关。而北斗星基增强系统生成的差分改正数的目的就是提升空间信号的精度。因此空间信号精度是评估北斗星基增强系统一个重要指标。

以下主要介绍评估空间信号精度的评估方法。

6.3.1 空间信号精度模型

目前系统实时的空间信号精度评估，采用综合多个监测站对卫星的 UERE 结果，来评估一颗卫星的区域用户距离精度（RURA，Regional User Range Accuracy）。

采用无电离层组合的观测值进行处理，UERE 的计算公式如下：

$$UERE = PC - \rho - c \cdot (\tau_{rec} - \tau^{sat}) - \Delta corr \quad (6-1)$$

式中， PC 为伪距无电离层组合观测值， ρ 为几何距离， $\rho = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2}$ ， (X_r, Y_r, Z_r) 为监测站坐标，已精确测定， (X^s, Y^s, Z^s) 为卫星坐标，通过广播星历计算得到。 c 代表光速， τ_{rec}, τ^{sat} 分别为测站和卫星钟差， $\Delta corr$ 为公共误差，包含对流层延迟、地球自转、以及卫星和接收机硬件延迟等， δ_{SBAS} 为星基改正数信息。

对于某一历元卫星的 RURA，需要综合多个监测站的 UERE 结果。

$$RURA = \sqrt{\sum_{i=1}^n UERE_i^2 / n} \quad (6-2)$$

式中， $UERE_i$ 代表不同测站对同一颗卫星监测的信号精度， n 为监测站个数，综合处理得到卫星的 RURA 结果。对于某颗卫星一天的 RURA 值，通常采用其

RMS 值进行统计，其值越小则表示系统精度越高。

相应的，采用用户差分距离误差 UDRE(User Differential Ranging Error)对星基增强系统空间信号的精度进行评估。UDRE 计算公式为：

$$\text{UDRE} = PC - \rho - c \cdot (\tau_{rec} - \tau^{sat}) - \Delta corr - \delta_{SBAS} \quad (6-3)$$

式中， PC 、 ρ 、 c 、 τ_{rec} 、 τ^{sat} 、 $\Delta corr$ 的含义与式 (7-1) 相同， δ_{SBAS} 为星基改正数信息，包含钟差改正数、轨道改正数。通常对不同历元的 UDRE 进行 RMS 统计，它反映星基增强系统空间信号的精度，其值越小，代表差分改正数的精度越高。

6.3.2 空间信号精度评估结果

为了评估北斗星基增强系统的空间信号精度，采用 2017 年 3 月 1 日-30 日的连续的北斗实测数据，根据以上 RURA、UDRE 的算法，计算出 1-14 号卫星的 RURA 和 UDRE 结果，统计每颗卫星每一天 RURA 和 UDRE 的 RMS 值，结果如图 46-48 所示。

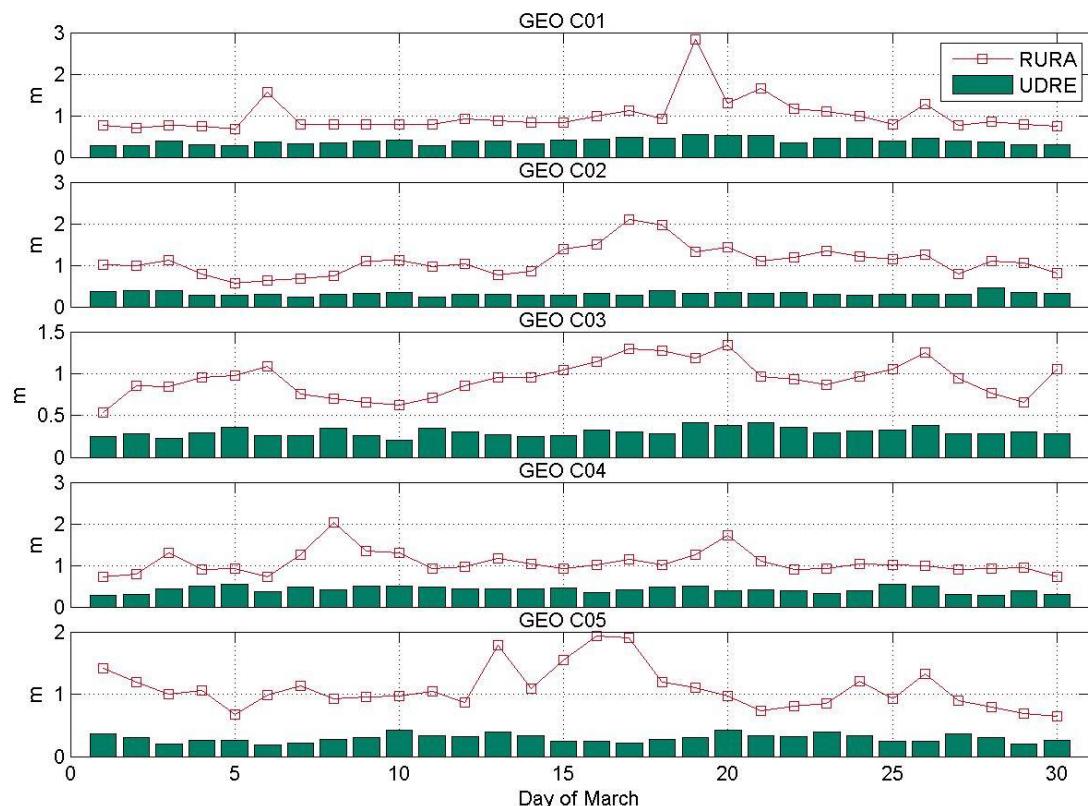


图 46 1-5 号卫星的 1 个月的 RURA 和 UDRE 时间序列图

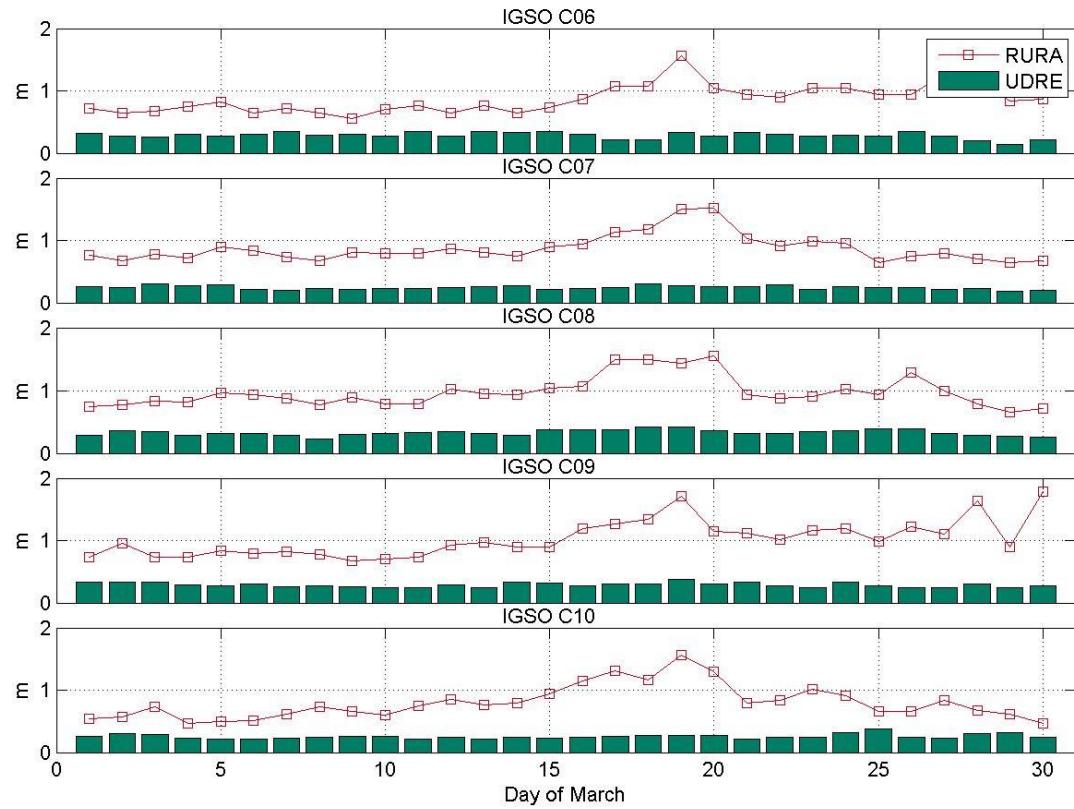


图 47 6-10 号卫星的 1 个月的 RURA 和 UDRE 时间序列图

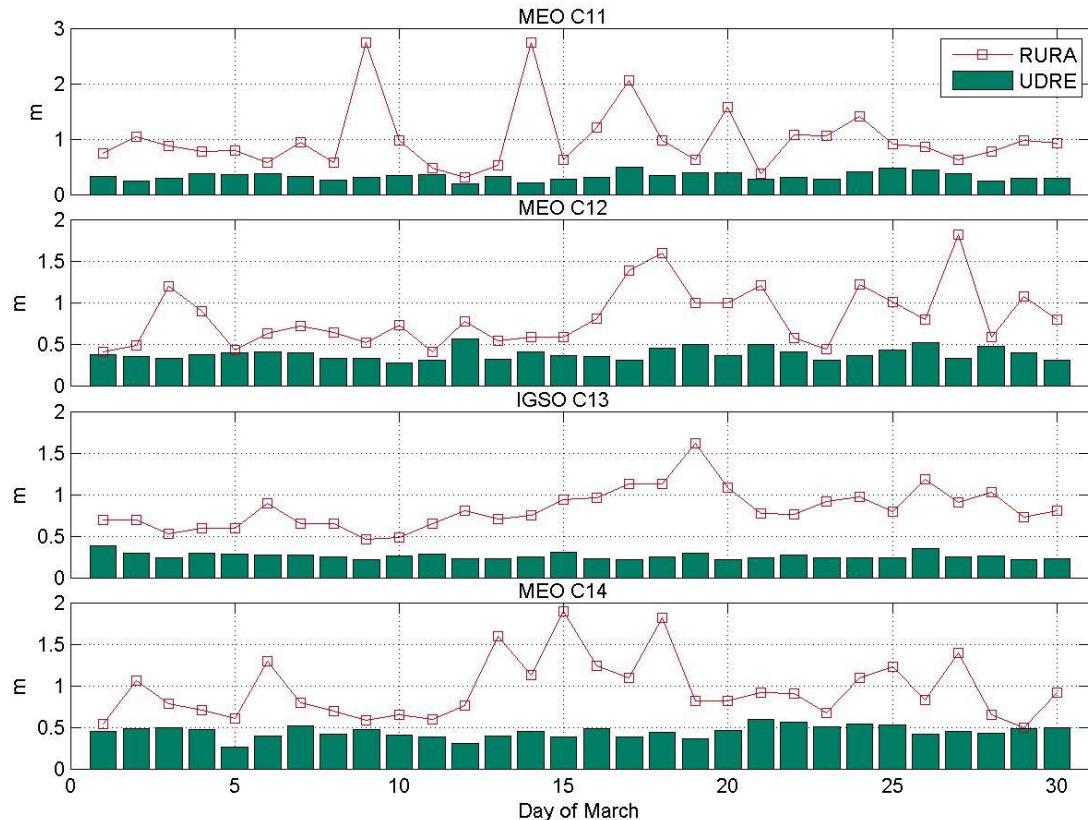


图 48 11-14 号卫星的 1 个月的 RURA 和 UDRE 时间序列图

图 46-48 中, 红色曲线代表北斗卫星的区域用户距离精度 RURA (仅使用广播星历), 绿色的柱状数据代表北斗星基增强系统卫星的用户差分距离误差 (使用广播星历+差分改正数), 每 1 个数据点代表 1 天结果的 RMS 统计值。可看到所有卫星使用钟差和轨道改正数后, 卫星信号精度 UDRE 相对于 RURA 得到显著的提升, 且卫星 UDRE 的长期结果是稳定的, 卫星信号精度连续 1 个月的统计值如下表:

表 13 北斗卫星 2017 年 3 月的 RURA 和 UDRE 统计均值

卫星号	RURA (m)	UDRE (m)
1	1.00	0.39
2	1.10	0.31
3	0.94	0.30
4	1.06	0.42
5	1.09	0.30
6	0.87	0.29
7	0.87	0.35
8	0.98	0.33
9	1.03	0.39
10	0.80	0.46
11	1.01	0.33
12	0.83	0.38
13	0.83	0.26
14	0.95	0.45
GEO	1.04	0.34
IGSO	0.9	0.35
MEO	0.93	0.39
均值	0.95	0.35

如表 12 结果所示, 根据 2017 年 3 月的北斗数据统计结果, 北斗卫星使用星基增强系统生成的钟差和轨道改正数后, 对于不同类型的卫星, 空间信号精度有不同程度的提升, GEO 卫星信号精度由 1.04m 提升为 0.34m, IGSO 卫星由 0.9m 提升为 0.35m, MEO 卫星由 0.93m 提升为 0.39m。

6.4 北斗星基增强系统定位服务精度评估

6.4.1 差分用户定位模型

GNSS 的主要应用就是为用户提供定位导航授时服务, 因此用户的定位服务

是系统服务精度的重要的服务指标之一。

根据公式(5-15), 差分用户定位的观测方程可写为:

$$P = \sqrt{(X_r - X^s)^2 + (Y_r - Y^s)^2 + (Z_r - Z^s)^2} + c(\delta t - \delta t^s) + \Delta corr + \delta_{SBAS} + v \quad (6-4)$$

式中, P 为伪距观测量, (X_r, Y_r, Z_r) 为待求的测站坐标, (X^s, Y^s, Z^s) 为卫星坐标, δt 为接收机钟差, δt^s 为卫星钟差, $\Delta corr$ 为观测误差延迟改正量, δ_{SBAS} 表示差分改正数的修正量, v 表示观测分量的残差。

双频差分用户使用无电离层组合消除电离层影响, 单频差分用户使用播发的格网电离层改正量计算电离层延迟量。

上式经过线性化为:

$$v = A \cdot \delta X - l \quad (6-5)$$

$$A = \begin{pmatrix} X_0 - X^s & Y_0 - Y^s & Z_0 - Z^s & 1 \\ \rho & \rho & \rho & \end{pmatrix}, \delta X = \begin{pmatrix} \delta X_r \\ \delta Y_r \\ \delta Z_r \\ c\delta t \end{pmatrix} \quad (6-6)$$

$$l = P - \sqrt{(X_0 - X^s)^2 + (Y_0 - Y^s)^2 + (Z_0 - Z^s)^2} + c\delta t^s - \Delta corr - \delta_{SBAS} \quad (6-7)$$

其中, (X_0, Y_0, Z_0) 为侧站坐标的初值, A 为系数项, δX 为待求参数, l 为常数项。若观测值权阵为 P , δX 的求解方程写作:

$$\delta X = (A^T PA)^{-1} (A^T Pl) \quad (6-8)$$

通过迭代计算可得到差分用户的三维坐标, 与精确测定的坐标值进行比较, 将定位误差转换到测站坐标系, 可统计差分用户的定位误差。

6.4.2 差分用户定位精度分析

基于以上分析的结果, 利用 2017 年 3 月 1 日-2017 年 3 月 30 日 30 天的实测数据对北斗星基增强系统的用户定位精度进行评估, 对差分单/双频用户的定位结果进行统计分析, 定位计算中对流层、固体潮、相对论、卫星和接收机天线相位中心改正等采用模型计算扣除。

单频差分用户使用钟差和轨道改正数, 电离层误差采用播发的格网电离层改正数进行修正。统计动态坐标与精确坐标的差异, 下图表示了中国国土范围内的测站单频差分定位在测站站心地平坐标系中平面及高程方向的定位精度(RMS)。

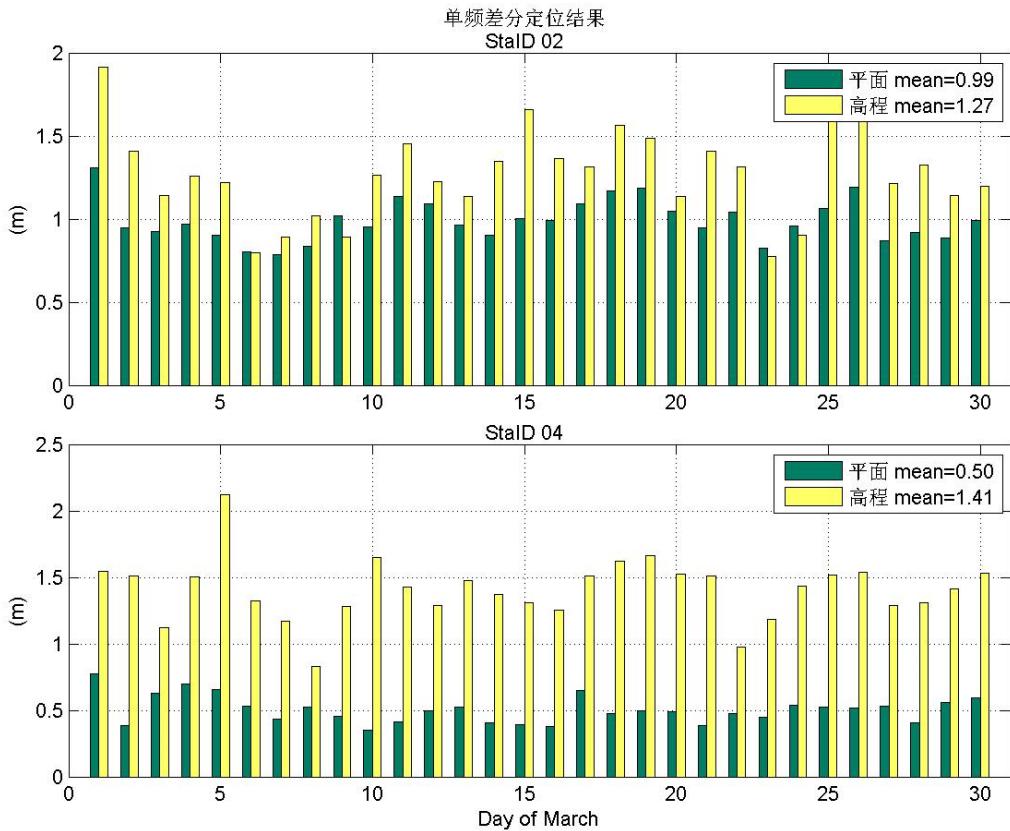


图 49 北方和南方地区测站单频差分定位结果

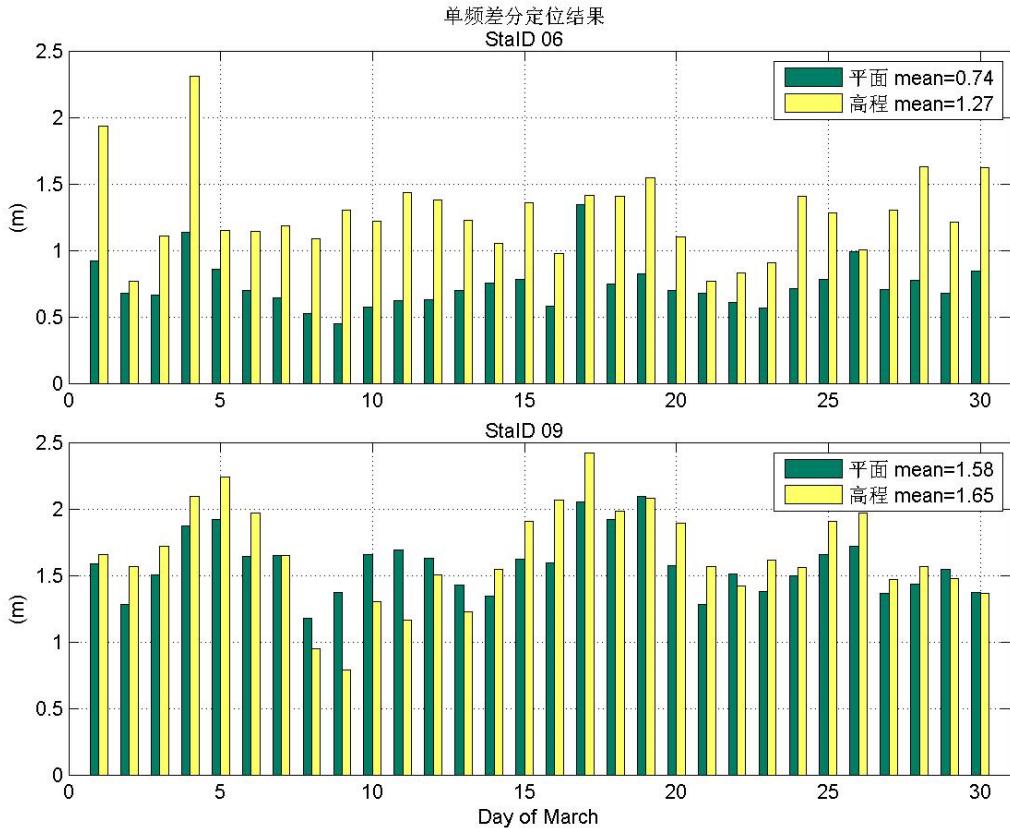


图 50 西部和东北地区测站单频差分定位结果

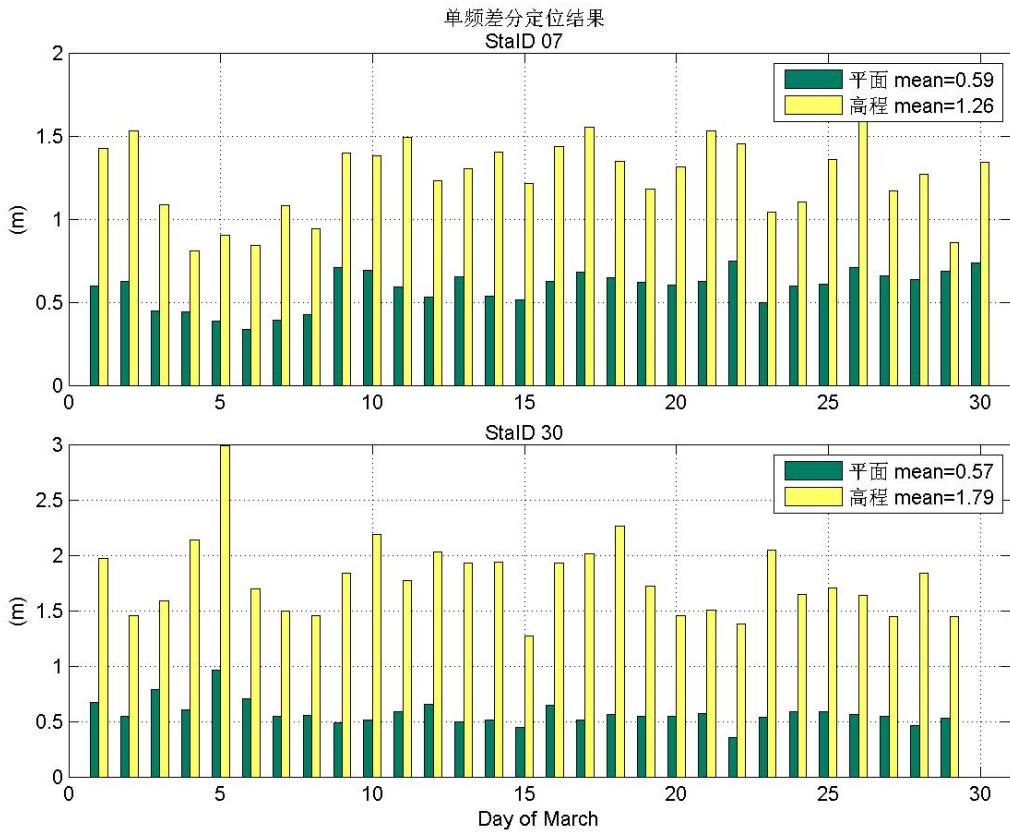


图 51 中部和南海地区测站单频差分定位结果

双频差分用户使用钟差和轨道改正数，电离层误差采用双频无电离层组合观测值进行修正。下图表示了中国国土范围内的测站双频差分定位在测站站心地平坐标系中平面及高程方向的定位精度(RMS)。

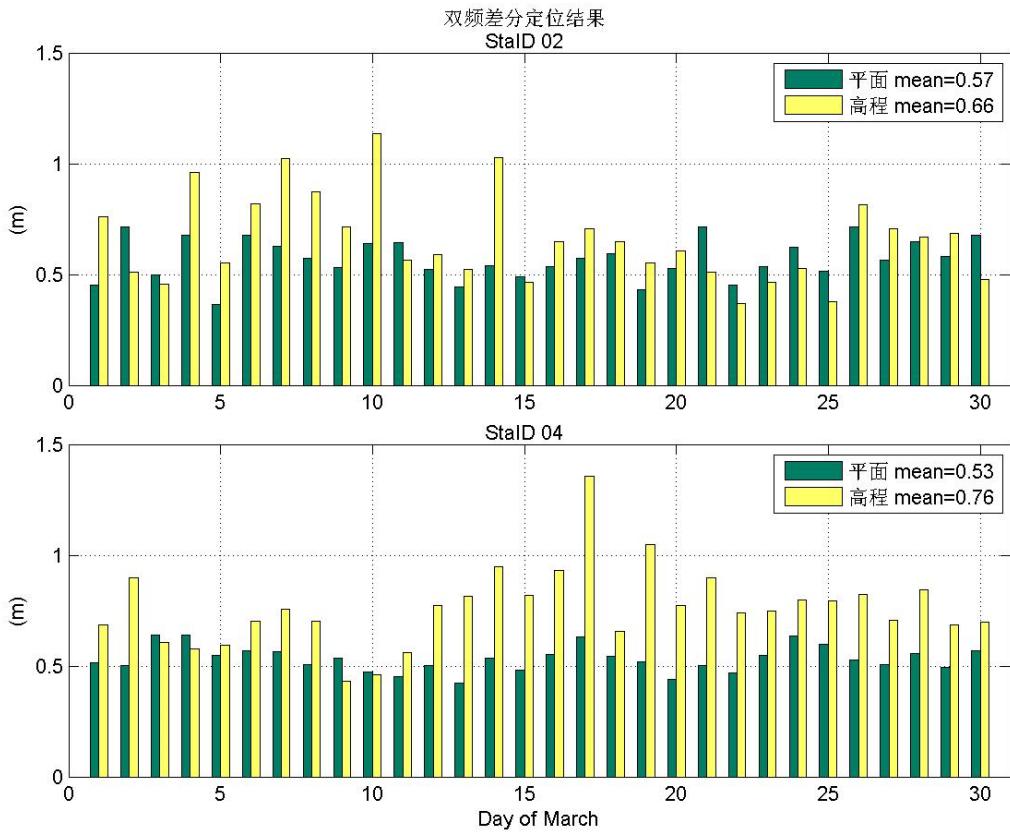


图 52 北方和南方地区测站双频差分定位结果

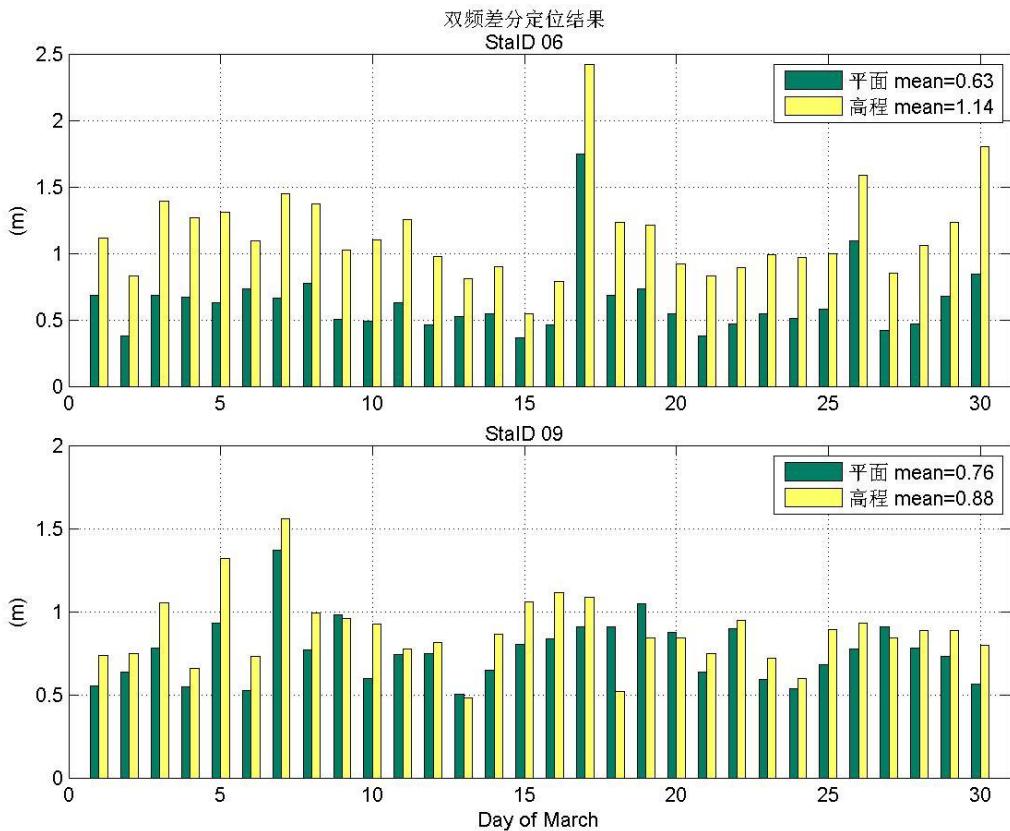


图 53 西部和东北地区测站双频差分定位结果

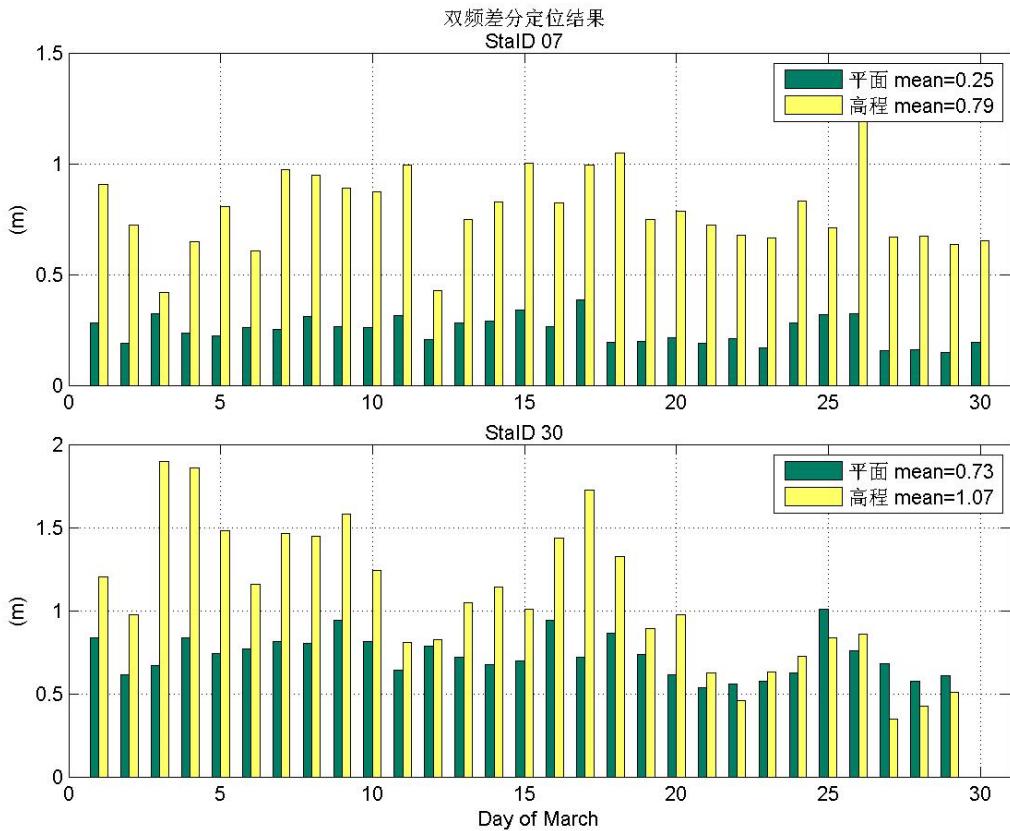


图 54 中部和南海地区测站双频差分定位结果

表 14 单/双频测站差分定位平均结果统计(m)

测站编号	单频差分定位			双频差分定位		
	平面	高程	三维	平面	高程	三维
2	0.99	1.27	1.62	0.57	0.66	0.88
4	0.50	1.41	1.50	0.53	0.76	0.93
6	0.74	1.27	1.48	0.63	1.14	1.31
9	1.58	1.65	2.29	0.76	0.88	1.17
7	0.59	1.26	1.39	0.25	0.79	0.83
30	0.57	1.79	1.88	0.73	1.07	1.31
平均	0.83	1.44	1.69	0.58	0.88	1.07

在中国范围内，分别选取南方、北方、西部、东北、中部以及南海等地区的测站 1 个月的数据，利用北斗广播星历和星基增强改正数，计算测站单/双频差分定位结果。

图 49-51 中，显示了测站单频差分定位结果，图 52-54 位测站双频差分定位结果，连续 1 个月的测站差分定位结果较为稳定。大部分测站单频差分定位，水平方向精度在 1.5m 左右，高程方向精度基本在 1m 以内；双频差分定位的水平

方向精度在 1m 左右，高程精度在 0.6m 左右。但是东北地区的 9 号测站单频差分定位结果稍差，三维定位精度平均值达到 2.29m，可能的原因是中国东北部的测站分布很少，导致东北地区的部分格网点无法提供电离层改正数。综合以上测站定位结果的数据，北斗单频差分用户的定位精度，水平方向为 0.83m，高程为 1.44m，三维精度为 1.69m；双频差分用户的定位精度，水平方向为 0.58m，高程为 0.88m，三维精度为 1.07m。

6.5 小结

论文第四章介绍了等效钟差的计算模型，并从采用的观测数据精度以及改正数参数形式两方面对其进行提升。首先，数据处理引入了更高精度相位观测数据。考虑到相位观测数据的模糊度参数处理复杂，直接使用将大大增加实时处理系统设计的复杂性；本论文利用相位历元间差分数据，通过历元间差分消除了模糊度参数，简化了处理处理的复杂性。其次，新模型还增加了轨道改正数的计算，用于改正目前等效钟差模型中没有考虑的轨道切向和法向分量上的误差。本章利用北斗的实测数据对本论文提出的广域差分模型进行北斗星基增强进行试验分析，与等效钟差模型作比较，得到以下结论：

利用相位历元间差分数据和伪距数据，综合解算差分改正数，提高了差分信息的解算精度。对于 GEO 卫星，卫星 UDRE 提高百分比为 27%，对于 IGSO 卫星，提高百分比为 35%，对于 MEO 卫星，提高百分比为 24%；采用新模型得到的广域差分改正数显著改善了用户定位精度。南北、东西、高程方向的定位精度分别提升了 23%，32% 和 52%；测站三维定位精度提高了 27%；目前北斗单频差分用户使用差分产品进行定位后，平均定位精度达到水平 0.88m，高程 1.28m，三维 1.57m。

将本论文提出的综合伪距相位的广域差分新模型应用于北斗星基增强系统，在此条件下，从空间信号精度和差分用户定位精度两方面来评估北斗星基增强系统的服务性能。在介绍空间信号精度评估的理论方法，以及用户如何使用差分改正数进行定位并进行定位精度评估的方法的基础上，利用 2017 年 3 月份 30 天的实测北斗数据对北斗星基增强系统的精度进行评估，发现以下结果：

(1) 北斗卫星使用星基增强系统生成的钟差和轨道改正数后，对于不同类型的卫星，空间信号精度有不同程度的提升，GEO 卫星信号精度由 1.04m 提升为 0.34m，提升 67%，IGSO 卫星由 0.9m 提升为 0.35m，提升 61%，MEO 卫星由 0.93m 提升为 0.39m，提升 58%；北斗星基增强系统平均的卫星 UDRE 为 0.35m。

(2) 在我国国土范围内选择不同地理位置的测站，分析长达 1 个月的单/

双频差分定位结果，发现定位误差连续稳定，说明北斗星基增强系统提供可靠稳定的服务性能。北斗单频差分用户的定位精度，水平方向为 0.83m，高程为 1.44m，三维精度为 1.69m；双频差分用户的定位精度，水平方向为 0.58m，高程为 0.88m，三维精度为 1.07m。

7 总结与展望

7.1 本文主要工作总结

我国于 2006 年开始建设北斗二代导航系统，在 2012 年底，已建成了北斗区域卫星导航系统，系统具备覆盖亚太地区的定位、导航和授时以及短报文通信服务能力。与其他 GNSS 系统不同，北斗卫星导航系统在系统设计时就融合考虑了基本服务与广域差分的一体化，统一建设北斗区域卫星导航系统和北斗星基增强系统，给用户提供开放以及授权服务。

本文主要针对我国北斗星基增强系统，研究了北斗分米级星基增强系统的关键技术，重点阐述了卫星钟差改正数和轨道改正数的算法，并对北斗星基增强模型进行详细的分析，利用大量北斗实测数据进行北斗星基增强的试验，对系统进行精度评估。本文主要工作内容如下：

(1) 详细介绍了北斗星基增强理论以及数据处理方法。首先阐述了观测值、观测值误差改正模型以及数据的预处理方法，分析了轨道误差对不同测站测距误差影响，轨道径向误差在不同方向造成的测距误差在厘米量级；而卫星轨道径向垂直方向的误差在不同天底角引起的测距误差占轨道误差 dR^\perp 的比例，GEO/IGSO 卫星最大可达 15%，MEO 卫星最大可达 23%。基于以上分析，广域差分模型增加了三维轨道改正数的求解。另外增加了相位历元间差分数据的处理，避免了因相位数据周跳引起的 CNMC 重新初始化的问题。

(2) 对星基增强模型进行了各种影响因素的分析：从观测数据采样率、参与解算的监测站的个数分布等角度对模型进行了研究，根据实测数据解算结果，当数据采样率在 1s、3s、10s 和 20s 的时候，随着数据采样率的增加，卫星 UDRE 基本上随采样率的变大而增大，当采样率小于 10s 时，UDRE 基本没影响；选取分布较为均匀的测站，用少量的测站就可以实现星基增强的效果。分别对均值预报、线性模型预报 2 种钟差预报模型进行评估，发现两种钟差预报得到的钟差改正数参数相差厘米量级，相应的在差分用户定位精度影响为厘米，可忽略不计。

(3) 对轨道模型进行分析，讨论卫星轨道改正数的 PDOP 值，由于地面测站相对于天上卫星几何构型较为集中，PDOP 值较大，因此在解算轨道改正数时，设置合理的 PDOP 约束条件：当移动卫星的 DOP 值小于 20，解算的轨道改正数才算有效值。研究轨道改正数速度项，发现引入轨道改正数速度项对用户站定位精度的影响为毫米到厘米级别，可忽略不计。利用卫星状态转移矩阵作为约束条件，解算卫星的轨道改正数，发现约束前后轨道改正数的值差异在厘米量级。

(4) 研究伪距偏差对广域差分的影响, 通过对长期的北斗精密定轨后的伪距残差结果进行分析, 发现北斗伪距偏差的特性, GEO 卫星的伪距偏差是长期稳定的, IGSO/MEO 卫星的伪距偏差与高度角相关, 且两组卫星类型的伪距偏差存在差异。根据分析结果, 为不同类型的卫星建立北斗伪距偏差修正模型, 并将模型应用到北斗广域差分计算中。利用北斗实测数据进行验证, 分析北斗伪距偏差模型的应用效果。结果表明, 使用北斗伪距偏差模型后, UDRE 以及用户增强定位精度都得到提升, 用户增强定位水平和高程分别提高了 10.6% 和 14.6%。

(5) 对利用实测气象参数模型计算的对流层延迟量精度进行评估, 发现模型计算的对流层延迟精度在分米量级, 但是使用不同的对流层延迟计算得到的卫星 UDRE 结果相差几个厘米, 因为对流层延迟的差异已被钟差轨道改正数吸收, 各自产品之间是自洽的。

(6) 采用北斗实测数据进行北斗星基增强的试验。利用相位历元间差分数据和伪距数据, 综合解算差分改正数, 提高了差分信息的解算精度。对于 GEO 卫星, 卫星 UDRE 提高百分比为 27%, 对于 IGSO 卫星, 提高百分比为 35%, 对于 MEO 卫星, 提高百分比为 24%; 采用新模型得到的广域差分改正数显著改善了用户定位精度。南北、东西、高程方向的定位精度分别提升了 23%, 32% 和 52%; 测站三维定位精度提高了 27%; 目前北斗单频差分用户使用差分产品进行定位后, 平均定位精度达到水平 0.88m, 高程 1.28m, 三维 1.57m。

(7) 采用大量北斗实测数据, 对系统进行精度评估。北斗卫星使用星基增强系统生成的钟差和轨道改正数后, 对于不同类型的卫星, 空间信号精度有不同程度的提升, GEO 卫星信号精度由 1.04m 提升为 0.34m, 提升 67%, IGSO 卫星由 0.9m 提升为 0.35m, 提升 61%, MEO 卫星由 0.93m 提升为 0.39m, 提升 58%; 北斗星基增强系统平均的卫星 UDRE 为 0.35m。在我国国土范围内选择不同地理位置的测站, 分析长达 1 个月的单/双频差分定位结果, 发现定位误差连续稳定, 说明北斗星基增强系统提供可靠稳定的服务性能。北斗双频差分用户的定位精度, 水平方向为 0.58m, 高程为 0.88m, 三维精度为 1.07m; 单频差分用户的定位精度, 水平方向为 0.83m, 高程为 1.44m, 三维精度为 1.69m。

7.2 今后研究工作展望

本文提出了综合伪距相位的广域差分模型, 并通过北斗实测数据进行试验分析, 验证其可行性, 北斗服务性能从空间信号精度、用户定位精度等角度也得到提升。在今后的研究工作中, 仍需要进一步的研究:

(1) 相位历元间差分数据能够解算高精度的差分改正数变化, 但是伪距求

取的改正数作为绝对基准仍有误差。因此可考虑使用相位非差数据解算差分改正数，但是需要解决模糊度快速固定的问题。

(2) 北斗在建设全球导航系统时，将会产生星间链路数据，在解算轨道改正数时增加星间链路数据，可降低轨道改正数的 DOP 值，提高轨道改正数的解算精度。

参考文献

- [1] Black H D. An easily implemented algorithm for the tropospheric range correction[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1978, 83(B4):1825–1828.
- [2] Blewitt, Geoffrey. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data[J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(3):199-202.
- [3] Bock H. Efficient Methods for Determining Precise Orbits of Low Earth Orbiters Using the Global Positioning System. [D] Switzerland: Astronomical Institute University of Berne, 2003.
- [4] Bruckner D, van Graas F, Skidmore T. Statistical characterization of composite protection levels for GPS[J]. GPS solutions, 2011, 15(3): 263-273.
- [5] C Kee, BW Parkinson, P Axelrad. Wide area differential GPS[J]. Navigation, 1991, 38(2): 123-145.
- [6] Cao Y L, Hu X G, Wu B, et al. The wide-area difference system for the regional satellite navigation system of COMPASS [J]. Science China Physics Mechanics & Astronomy, 2012, 55(6):1307–1315
- [7] Cao Yueming, Hu Xiaogong, Zhou Jianhua, et al. Kinematic Wide Area Differential Corrections for BeiDou Regional System basing on two-way Time Synchronization[C]// China Satellite Navigation Conference (CSNC). 2014:277-288
- [8] CHAO Y C. Real Time Implementation of the Wide Area Augmentation System for the Global Positioning System with an Emphasis on Ionospheric Modeling[D]. Stanford University, 1999.
- [9] Chen J, Huang Z, Li R. Computation of satellite clock–ephemeris corrections using a priori knowledge for satellite-based augmentation system[J]. GPS Solutions, 2016: 1-11.
- [10]Creel T, Dorsey A J, Mendicki P J, et al. Accuracy and Monitoring Improvements from the GPS Legacy Accuracy Improvement Initiative[J]. Biochemical Journal, 2006, 326 (Pt 3)(3):799-806.
- [11]Creel T, Dorsey A J, Mendicki P J, et al. Summary of accuracy improvements from the GPS Legacy Accuracy Improvement Initiative (L-AII)[J]. 2007.
- [12]Danan, DONG, CHEN, et al. Multi-antenna synchronized global navigation satellite system receiver and its advantages in high-precision positioning applications[J]. Frontiers of Earth Science, 2016(4):772-783.
- [13]Dong D, Wang M, Chen W, et al. Mitigation of multipath effect in GNSS short baseline positioning by the multipath hemispherical map[J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(3):255-262.
- [14]El-Arini M B, Conker R S, Albertson T W, et al. Comparison of Real-Time Ionospheric Algorithms for a GPS Wide-Area Augmentation System (WAAS) [J]. Navigation, 1994, 41(4):393–414.

- [15]Evers, 刘直. 差分 GPS[J]. 导航, 1990(2):11-21.
- [16]Gao G X, Chen A, Lo S, et al. Compass-M1 broadcast codes in E2, E5b, and E6 frequency bands[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(4): 599-612.
- [17]Ge M, Chen J, Douša J, et al. A computationally efficient approach for estimating high-rate satellite clock corrections in realtime[J]. GPS Solutions, 2012, 16(1):9-17
- [18]Ge M, Gendt G, Dick G, et al. Impact of GPS satellite antenna offsets on scale changes in global network solutions[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(6):83-100.
- [19]GPS 官网, 2016. <http://www.gps.gov/multimedia/presentations/2016/12/IGNSS-australia/auerbach.pdf>
- [20]GPS 官网, 2017. <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- [21]Grelier T, Dantepal J, Delatour A, et al. Initial observations and analysis of compass MEO satellite signals[J]. Inside GNSS, 2007, 2(4): 39-43.
- [22]Hatch R. The synergism of GPS code and carrier measurements[C]//International geodetic symposium on satellite doppler positioning. 1983, 1: 1213-1231.
- [23]Hein G W, Pany T. Architecture and signal design of the european satellite navigation system galileo-status dec. 2002[J]. Positioning, 2009, 1(02).
- [24]Heng L, Gao G X, Walter T, et al. Statistical characterization of GLONASS broadcast ephemeris errors[C]//Proceedings of the 24th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2011), Portland, OR. 2011: 3109-3117.
- [25]Heng L. Safe satellite navigation with multiple constellations: global monitoring of GPS and GLONASS signal-in-space anomalies[D]. STANFORD UNIVERSITY, 2012.
- [26]Heßelbarth A, Wanninger L. SBAS orbit and satellite clock corrections for precise point positioning[J]. GPS solutions, 2013, 17(4): 465-473.
- [27]Hopfield H S. Two - quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1969, 74(18):4487-4499.
- [28]<http://www.gps.gov/multimedia/presentations/2016/12/IGNSS-australia/auerbach.pdf>
- [29]Jang J, So H, Lee K, et al. Spatial Decorrelation of SBAS Satellite Error Corrections in the Korean Peninsular[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2016, 17(1): 73-79.
- [30]Jeong M S, Kim J R. Accuracy Analysis of SBAS Satellite Orbit and Clock Corrections using IGS Precise Ephemeris[J]. Journal of Korea Navigation Institute, 2009, 13(2).
- [31]Lee J H, Shim D S. Fast acquisition of GPS L5 PRN and NH code using L1 signal for software receivers[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2016, 14(4): 1133-1139.

- [32]Misra, Pratap. Global positioning system : signals, measurements, and performance[M]. Ganga-Jamuna Press, 2011.
- [33]Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective[J]. GPS Solutions, 2015, 19(2):321-333.
- [34]Montenbruck O, Steigenberger P, Prange L, et al. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS)—Achievements, Prospects and Challenges[J]. Advances in Space Research, 2017, 59(7): 1671-1697.
- [35]Phelts R E, Walter T, Enge P, et al. Range biases on the WAAS geostationary satellites[J]. Power, 2004, 25: 30.
- [36]Prasad N, Sarma A D. Ionospheric Time Delay Estimation Using IDW Grid Model for GAGAN. J Indian Geophys Union[J]. 2004, 8(4).
- [37]Qian X, Jin S, Wu X. Snow depth variations estimated from three-frequency GPS interferometric reflectometry[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016 IEEE International. IEEE, 2016: 6086-6089.
- [38]Revnivtsev S. GLONASS ground control segment: orbit, clock, time scale and geodesy definition. In: Proceedings of ION GNSS 2012, Nashville, TN, pp 3931–3949
- [39]Revnivtsev S. GLONASS status and modernization[C]//Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011), Portland, OR. 2011: 839-854.
- [40]Saastamoinen J. Contributions to the theory of atmospheric refraction. Part II. Refraction corrections in satellite geodesy.[J]. Bull Géod, 1973, 107(6):13-34.
- [41]Sainan Yang, Junping Chen, Yize Zhang, et al. BDS Code Bias and Its Effect on Wide Area Differential Service Performance[J]. 2017.
- [42]Saleem T, Usman M, Elahi A, et al. Simulation and Performance Evaluations of the New GPS L5 and L1 Signals[J].
- [43]Schmid R, Steigenberger P, Gendt G, et al. Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas [J]. Journal of Geodesy, 2007, 81(12):781-798.
- [44]Shallberg K, Shloss P, Altshuler E, et al. WAAS measurement processing, reducing the effects of multipath[C]//14 th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation(ION GPS 2001), Salt Lake City, UT. 2001: 2334-2340.
- [45]Steigenberger P, Montenbruck O, Hessel U. Performance evaluation of the early CNAV navigation message[J]. Navigation, 2015, 62(3): 219-228.
- [46]Steigenberger P, Montenbruck O. Galileo status: orbits, clocks, and positioning[J]. GPS Solutions, 2016: 1-13.
- [47]Tsai Y J. Wide area differential operation of the global positioning system: ephemeris and clock algorithms[D]. Stanford University, 1999.
- [48]Urlichich Y, Subbotin V, Stupak G, et al. GLONASS modernization[J]. GPS world, 2011, 22(11): 34-39.
- [49]Weiss M, Ashby N. Global Positioning System Receivers and Relativity[J]. NIST

- technical note, 1999 (1385): 1-46.
- [50] Wikipedia, 2017a. https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System
- [51] Wikipedia, 2017b. <https://en.wikipedia.org/wiki/GLONASS>
- [52] Wikipedia, 2017c. [https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(satellite_navigation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_(satellite_navigation))
- [53] Wu X L, Zhou J H, Gang W, et al. Multipath error detection and correction for GEO/IGSO satellites[J]. Science China Physics Mechanics & Astronomy, 2012, 55(7):1297-1306.
- [54] Wu X L, Zhou J H, Tang B, et al. Evaluation of COMPASS ionospheric grid [J]. GPS Solutions, 2014, 18(18):639-649
- [55] Wu X, Hu X, Wang G, et al. Evaluation of COMPASS ionospheric model in GNSS positioning[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(6):959-968
- [56] Yang W, Gong H, Zhu X, et al. Non-Reciprocity Correction Using Broadcast Ephemeris in Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT)[M]// China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings. Springer Berlin Heidelberg, 2013:407-417.
- [57] Zaminpardaz S, Teunissen P J G, Nadarajah N. GLONASS CDMA L3 ambiguity resolution and positioning[J]. GPS Solutions, 2016: 1-15.
- [58] Zhou S S, Hu X G, Li L, et al. Applications of two-way satellite time and frequency transfer in the BeiDou navigation satellite system[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2016, 59(10):109511.
- [59] Zhou S S, Hu X G, Wu B, et al. Orbit determination and time synchronization for a GEO/IGSO satellite navigation constellation with regional tracking network [J]. Science China Physics Mechanics & Astronomy, 2011, 54(6):1089-1097
- [60] Zhu S Y, Massmann F H, Yu Y, et al. Satellite antenna phase center offsets and scale errors in GPS solutions [J]. Journal of Geodesy, 2003, 76(11):668-672.
- [61] 北斗卫星导航系统简介 [EB/OL], <http://www.beidou.gov.cn/xtjs.html>
- [62] 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号（2.0 版），中国卫星导航系统管理办公室, 2013
- [63] 曹月玲. BeiDou 区域导航系统广域差分及完好性监测研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014
- [64] 曾琪, 吴多, 刘万科. 基于长期数据的北斗广播星历精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(11):958-962
- [65] 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, 45: 079508
- [66] 陈俊平, 杨赛男, 周建华, 等. 综合伪距相位观测的北斗导航系统广域差分模型. 已被《测绘学报》收录
- [67] 陈俊平. 低轨卫星精密定轨研究[D]. 上海: 同济大学, 2007
- [68] 陈俊勇, 刘经南, 张燕平, 等. 分布式广域差分 GPS 实时定位系统[J]. 测绘学报, 1998, 27(1):1-8
- [69] 陈良, 耿长江, 周泉. 北斗/GPS 实时精密卫星钟差融合解算模型及精度分析 [J]. 测绘学报, 2016, 45(9):1028-1034
- [70] 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[J].

- 中国科学院上海天文台年刊, 2010(1):45-53
- [71]程世来, 张小红. 基于 PPP 技术的 GPS 浮标海啸预警模拟研究[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2007, 32(9):764-766.
- [72]耿涛, 刘经南, 赵齐乐, 等. 星地监测网下的北斗导航卫星轨道确定[J]. 测绘学报, 2011(s1):46-51
- [73]胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证[D]. 武汉: 武汉大学, 2013
- [74]黄兵杰, 柳林涛, 高光星, 等. 基于小波变换的 GPS 精密单点定位中的周跳探测[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(6):512-515.
- [75]黄智, 袁洪, 万卫星. WAAS 电离层网格改正算法在中国地区部分站点的试算精度[J]. 全球定位系统, 2003, 28(6):5-10.
- [76]雷辉, 李志刚, 杨旭海, 等. 基于转发式的北斗卫星导航系统地球静止轨道卫星精密定轨试验[J]. 测绘学报, 2011(s1):31-33
- [77]李济生, 人造卫星精密轨道确定. 北京: 解放军出版社. 1995
- [78]李晓波. GNSS 天线相位中心改正模型的建立[D]. 中国地震局地震预测研究所, 2013.
- [79]李勇. GPS 全球卫星定位导航系统的发展与应用[J]. 电脑知识与技术: 学术交流, 2007, 3(18):1640-1641.
- [80]李征航, 丁文武, 李昭. GPS 广播星历的轨道误差分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(1):50-54
- [81]李征航. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉大学出版社, 2013.
- [82]刘伟平, 郝金明, 李建文, 等. 多 GNSS 融合的北斗卫星精密定轨[J]. 测绘学报, 2014, 43(11):1132-1138
- [83]刘伟平, 郝金明, 田英国, 等. 北斗卫星导航系统双差动力法精密定轨及其精度分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(2):131-139
- [84]刘文浩, Melgar D, Allen R M, 等. 基于 GPS 的新技术将海啸预警时间提前 20 分钟[J]. 国际地震动态, 2016(3):6-7.
- [85]刘焱雄, 范士杰, 乔方利, 等. 2011 年日本 Mw9.0 级地震的 GPS 响应研究[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(6):59-65.
- [86]宁津生, 姚宜斌, 张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1).
- [87]潘林, 蔡昌盛. 北斗广播星历精度评估[J]. 测绘通报, 2014(9):16-18
- [88]施闯, 赵齐乐, 李敏, 等. 北斗卫星导航系统的精密定轨与定位研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012(6):854-861
- [89]王刚, 魏子卿. 格网电离层延迟模型的建立方法与试算结果[J]. 测绘通报, 2000(9):1-2.
- [90]王永澄, 黄建宇. GPS 广域增强系统的电离层延迟网格校正法[J]. 通信学报, 1998(12):38-41.
- [91]魏传军. 基于地基 GNSS 观测数据的电离层延迟改正研究[D]. 长安大学, 2014.
- [92]邢楠. 广域差分技术在 COMPASS 系统定位服务中的应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013

- [93]杨赛男, 陈俊平, 曹月玲, 等. 空间信号精度的算法设计与实验分析[J]. 天文学进展, 2015(2):250-258.
- [94]杨赛男, 陈俊平, 张益泽, 等. 基于最小二乘频谱分析的 GPS/GLONASS 卫星钟差特性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(2):169-174.
- [95]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[J]. 中国科学地球科学, 2014(1):72-81
- [96]杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39(1):1-6
- [97]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[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7):2218-2227.
- [98]姚宜斌, 胡羽丰, 余琛. 一种改进的全球对流层天顶延迟模型[J]. 测绘学报, 2015, 44(3):242-249.
- [99]詹先龙, 刘瑞华, 杨兆宁. 北斗系统格网电离层延迟算法研究[J]. 航天控制, 2012, 30(1):15-19.
- [100]赵齐乐, 戴志强, 孙宾姿, 等. 方差分量估计分析北斗伪距信号精度[J]. 测绘科学, 2016, 41(2):182-186.
- [101]中华人民共和国国务院新闻办公室, 中国北斗卫星导航系统, 2016
- [102]周善石. 简化广域差分 GPS 系统在中国区域的建立与试算[D]. 同济大学, 2007

作者简介及在学期间发表的学术论文与研究成果

作者简介：

杨赛男，女，1990年7月生，江苏省泰兴市人。

2008年9月-2012年6月，在中南大学地球科学与信息物理学院测绘工程专业学习，获学士学位。

2012年9月-2017年5月，在中国科学院大学上海天文台攻读天体测量与天体力学专业理学博士。

已发表（或正式接收）的学术论文：

1、**杨赛男**, 陈俊平, 曹月玲,等. 空间信号精度的算法设计与实验分析[J]. 天文学进展, 2015(2):250-258.

2、**杨赛男**, 陈俊平, 张益泽,等. 基于最小二乘频谱分析的 GPS/GLONASS 卫星钟差特性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(2):169-174.

3、**Sainan Yang**, Junping Chen, Yize Zhang, et al. BDS Code Bias and Its Effect on Wide Area Differential Service Performance[J]. 2017. EI 论文;

4、陈俊平, **杨赛男**, 周建华, 等. 综合伪距相位观测的北斗导航系统广域差分模型. 已被《测绘学报》收录, 为 EI 论文。

5、Chen, J., Wang, J., Zhang, Y., **Yang, S.**, Chen, Q., & Gong, X. (2016). Modeling and assessment of gps/bds combined precise point positioning:. Sensors, 16(8), 1151.