



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

分析中心精密钟差及轨道数据与 IGS
最终产品间的特性

姓 名：严宇

学 号：1533360

所在院系：测绘与地理信息学院

学科门类：工学

学科专业：测绘科学与技术

指导教师：王解先 教授

陈俊平 研究员

二〇一八年三月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Engineering

**Characteristics of Precise Clock and Precise Orbit
Deviation between IGS and Analysis Centers**

Candidate: Yan Yu

Student Number: 1533360

School/Department: College of Surveying and
Geo-informatics

Discipline: Engineering

Major: Science and Technology of Surveying
and Mapping

Supervisor: Prof. Jiexian Wang

Research Junping Chen

March, 2018

分析中心精密钟差及轨道数据与ISS最终产品间的特性

严宇

同济大学

学位论文版权使用授权书

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

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：

年 月

摘要

IGS 最终产品由多个分析中心独立解算的结果综合计算而来，但相较于后者，时间上有一定的延迟；精密钟差和精密轨道产品是精密定位等应用的重要基础数据，同时也是维持卫星导航系统时空基准的重要依据。为得到更好的综合之后的 IGS 最终产品，本文针对分析中心精密钟差和精密轨道产品与 IGS 最终产品之间的差异进行了深入系统的研究，使用 IGS 跟踪站观测数据进行精密单点定位比较了两者在定位上的差异，通过消除系统性偏差比较了两者的随机性偏差，运用频谱分析的方法分析了两者偏差中存在的周期项，具体的工作内容和研究结论如下：

(1) 详细介绍了 IGS 的组织结构和产品，阐述了精密单点定位的基本原理，并分别利用分析中心精密钟差和精密轨道产品和 IGS 最终产品进行精密单点定位的实例计算，从而比较两者在定位应用上存在的差异。实际计算结果表明，采用分析中心的精密钟差和轨道产品与采用 IGS 最终产品的静态精密单点定位结果在 NEU 三个方向的差异均不超过 1cm，表明同一分析中心的精密钟差和精密轨道产品具有自洽性；

(2) 对分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品之间的偏差进行了比较分析，通过对原始数据做差，作差结果反映出两者存在系统性偏差，对系统性差偏差产生的原因进行了分析，同时，发现两者之间的钟差和轨道产品均存在周期性差异。通过七参数坐标转换消除了分析中心与 IGS 最终轨道产品之间的系统性偏差，比较了随机性偏差。结果表明相较于 EMR 和 ESA 这两个分析中心，JPL 与 IGS 之间的轨道产品一致性更好。由于 IGS 发布最终星历具有一定的延迟性，在 IGS 发布最终星历之前，用户自行综合时应给予 JPL 的轨道数据更大的权重；

(3) 通过快速傅里叶变换频谱分析和最小二乘频谱分析的方法研究了分析中心与 IGS 最终产品差异中存在的周期项，两种方法所得结论基本一致，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品偏差中均存在 43200s 左右的周期性偏差；然后比较了去除周期前后，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品差异的变化情况：①去周期后，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品随机性偏差的均值仍在零值附近摆动，对所有 GPS 卫星而言，绝大多数的标准差变小，说明去周期后两者一致性变好；②去周期后，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品随机性偏差的修正 Allan 标准差趋于稳定。

关键词：IGS 分析中心；精密钟差；精密轨道；精密单点定位；频谱分析

ABSTRACT

The IGS final products are combination of results calculated independently from IGS analysis centers, but there is a lag compared to the latter; precise ephemeris and clock products are important foundational data for applications such as precise point positioning, and are important basis for maintaining the space-time reference of satellite navigation systems. Firstly, this paper analyzes the difference characteristics between precise clocks and precise ephemeris of IGS and the final products of IGS analysis centers. Secondly, compares the difference between the PPP results of both by using the same observation data of the IGS tracking station. Thirdly, eliminates the system error to compare the random error. Lastly, find the periodical term existing in the difference between the two, by using the method of spectrum analysis. Specific research contents and results are as follows:

(1) The structure and products of IGS are introduced in detail. The basic principle of precise point positioning is elaborated. The difference between the PPP results of both products of IGS and IGS analysis center, by using the same observation data of the IGS tracking station, and the calculation results show that, the difference does not exceed 1 cm in all three directions of the NEU. The result indicates that the precise ephemeris and clock products of the same analysis center are self-consistent;

(2) A comparative analysis was made, between the analysis center precise ephemeris and clock products and the IGS final precise ephemeris and clock products. By subtraction, the result showed that there was a systematic deviation between the two, and the reason for the systematic deviation is given, at the same time, there is also a periodic difference. The systematic deviation between the analysis center precise ephemeris and the IGS final precise ephemeris is eliminated by using the method of seven-parameter coordinate transformation, and the random deviation is compared. The result showed that the consistency of precise ephemeris between JPL and IGS is better than that of EMR and IGS, also better than that of JPL and IGS. Since the IGS final precise ephemeris have a delay than the analysis center precise ephemeris, users should give greater weight to the precise ephemeris of JPL when they synthesize themselves.

(3) Through the methods of fast Fourier transform spectrum analysis and the

least-square spectrum analysis, the periodical items existing in the difference between the two are studied. The conclusions of the two methods are basically the same, there is a periodic deviation, which is about 43200s, between the analysis center precise ephemeris and clock products and the IGS final precise ephemeris and clock products. Comparing the difference between the deviations before and after removing periodic term, conclusions are as follows:①After removing the periodic term, the mean of the deviation still fluctuates around zero, for all GPS satellites, the majority of standard deviations become smaller, which indicates that the consistency becomes better;②After removing the periodic term, the corrected Allan standard deviation of the difference between the IGS final products and the analysis center products tends to be stable.

Keywords: IGS analysis center; precise clock; precise ephemeris; precise point positioning; spectrum analysis

目录

摘要.....	I
目录.....	IV
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状及进展.....	1
1.3 研究内容和意义.....	3
第 2 章 IGS 及其产品概述	4
2.1 IGS 简介.....	4
2.1.1 IGS 的宗旨.....	4
2.1.2 IGS 组成机构.....	5
2.1.3 IGS 星历数据产品.....	9
2.2 分析中心与 IGS 最终产品 PPP 精度对比.....	10
2.2.1 精密单点定位数学模型.....	10
2.2.2 精密单点定位误差来源.....	12
2.2.3 精度对比.....	14
2.3 小结.....	16
第 3 章 分析中心与 IGS 产品初步分析	17
3.1 数据简介.....	17
3.1 精密钟差产品分析.....	17
3.2 精密轨道产品分析.....	20
3.2.1 差异特性.....	20
3.2.2 坐标转换法去除系统误差.....	22
3.3 小结.....	26
第 4 章 频谱分析	27
4.1 傅里叶变换.....	27
4.1.1 傅里叶变换的定义.....	27
4.1.2 傅里叶变换的作用.....	29
4.2 快速傅里叶频谱分析.....	31
4.2.1 基本原理.....	31
4.2.2 分析结果.....	33
4.3 最小二乘频谱分析.....	37
4.3.1 基本原理.....	37
4.3.2 分析结果.....	38
4.4 去周期.....	42
4.4.1 去周期过程.....	42
4.4.2 去周期前后对比.....	43
4.5 小结.....	48
第 5 章 总结与展望	49
5.1 研究内容总结.....	49
5.2 下一步工作及展望.....	50

致谢.....	51
个人简历、在读期间发表的学术论文.....	52
参考文献.....	53
在读期间发表的学术论文与研究成果.....	51

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

国际 GNSS 服务组织 IGS (The International GNSS Service) 主要由数据中心、分析中心、协调分析中心、中心局及全球 GNSS 跟踪站等部分组成^[1], IGS 通过综合各家分析中心的产品得到 GNSS 卫星轨道、钟差和测站坐标等高精度的综合产品, 并将这些产品传送给全球资料中心和中央局的信息中心, 免费提供给用户使用^{[2]-[3]}。

IGS 精密钟差可以实现 IGS/BIPM 授时目标, 除此之外, 精密钟差是精密定位与卫星精密定轨等重要的基础数据^[4], 对高精度测站钟差和高采样率钟差产品的需求也促进了钟差综合方法研究的发展^[5]。分析中心的钟差解需先经过轨道、测站坐标等综合产品的一致性改正和时间基准的统一, 维持综合产品的一致性及消除分析中心间参考钟不同的影响, 然后, 经抗差估计计算等价权, 基于加权平均求得综合钟差^[6]。

IGS 精密轨道是精密定位、钟差估计和对流层参数估计等重要的基础数据^[7]。IGS 综合轨道目前由多家分析中心独立解算的轨道产品经综合计算得到。由于各家分析中心使用的基准站坐标、数据处理软件和定轨策略等不尽相同, 定轨结果会存在明显的差异^[8]。

这些产品的精度、产品之间的一致性和连续性是用户进行高精度导航/定位的基础保障。目前 IGS 所提供的精密星历的精度已优于 5cm ^[9], 卫星钟差改正数误差约为 $0.2\sim 0.3\text{ns}$ ^{[10]-[11]}。由于不同分析中心所解算的钟差结果相对于不同的参考钟, 由此引入了因参考基准不同的误差, 不同分析中心估计的卫星钟差的 RMS 的一致性大约为 $0.1\sim 0.2\text{ns}$ 或 $3\sim 6\text{cm}$ ^[12], 由于不同分析中心所采用的参考站分布、数据的不同以及所考虑的误差改正模型及所解算的参数并不完全一致, 使得解算得到的 GNSS 产品存在系统性的偏差。由于 IGS 最终产品相较于分析中心提供的产品在时间上有一定延迟, 用户有时也会选择分析中心产品进行定位等应用, 因此消除 IGS 分析中心的卫星轨道产品的系统性差异, 研究分析中心卫星轨道产品的随机性误差, 验证不同分析中心提供的卫星轨道和钟差产品的定位精度, 才能更好地使用这些产品, 指导用户实现高精度定位。

根据以上背景, 本文主要研究了 IGS 分析中心提供的精密钟差和轨道数据和 IGS 最终精密钟差和轨道产品之间的差异特性。首先详细介绍了 IGS 的组织结构和产品, 阐述了精密单点定位的基本原理, 并分别利用分析中心产品和 IGS 最终产品进行单点定位的实例计算, 从而比较两者在定位应用上存在的差异; 然后通过两次做差对两者的精密钟差产品差异进行分析, 并通过七参数坐标转换比较转换前后分析中心轨道产品和 IGS 轨道产品的差异, 最后通过快速傅里叶变换频谱分析和最小二乘频谱分析的方法研究了两者差异中存在的周期项, 这对进一步提高 IGS 产品综合的精度有重要意义。

1.2 国内外研究现状及进展

本文采用频谱分析的方法开展研究,包括傅里叶变换和最小二乘频谱分析。傅里叶变换的研究与应用已有一百多年历史,但仅在 1965 年离散傅里叶变换(DFT)的快速算法,快速傅里叶变换(FFT)算法出现后,才能利用计算机对它进行运算,从而为这一数学工具赋予了新的生命力^[13]。在信号处理中,DFT 的计算具有举足轻重的地位,信号的相关、滤波、谱估计等等都可通过 DFT 来实现^[14]。

快速傅里叶变换全称为 Fast Fourier Transform (下称 FFT),它是离散傅里叶变换的一种快速算法。在频谱分析中,可用 FFT 对时间序列的周期特性进行研究^[15]。若采样点个数为 N,则 FFT 的结果为 N 个复数,每个复数的模即为对应频率的振幅,通过比较各频率的振幅可以搜索出时间序列中的主频率,从而确定时间序列的主要周期^[16]。FFT 频谱分析的优点是其计算时间短,频率序列中的频率均为互不相关的正交频率,且可以通过 MATLAB 直接实现,但 FFT 有一个重要限制条件:采样的数据必须为连续等间隔采样。对于不满足这一条件的序列,必须进行内插补充数据使其成为连续等间隔采样后方可使用 FFT^[17]。

最小二乘频谱分析的英文全称为 Least Squares Spectral Analysis (下称 LSSA),与快速傅里叶变换频谱分析相比,LSSA 需要更长的计算时间,且结果频率可能互相相关,但是 LSSA 的突出优点是它不受数据采样间隔的影响,对于不等间距或出现数据断链的序列不需要通过插值进行预处理便可直接进行最小二乘频谱分析^[18]。

中国科学院张斌^[19]根据卫星钟固有的特性,即频移、频漂和频漂率以及周期性,提出一种新的拟合方法。新方法首先构造一个合理的钟差模型,该模型包含一个二次多项式和多个周期项。然后利用 IGS 提供的钟差产品数据,先粗略补充缺失数据,用二次多项式拟合,并对拟合后的残差进行小波分析,作降噪处理,最后通过谱分析,确定其主要的周期项,从而构建出适当的拟合模型,实现精密 GPS 卫星钟差拟合和预报。多天数据的实验结果表明,采用该新方法能够有效地对卫星钟差进行拟合和预报,满足不同目的和需求。

西南交通大学辛建^[20]分析了影响 GPS 卫星钟的物理因素,然后用 IGS 的精密卫星钟差产品分析其存在的周期性,最后建立了改进的二次多项式钟差预报模型。将构建的模型的预报精度与超快星历卫星钟差预报精度进行对比分析,从大多数的卫星钟差预报结果可知,改进的二次多项式预报模型要比超快星历钟差预报模型更好。与超快星历钟差预报模型相比,改进的二次多项式模型的预报精度分别改善:6 小时改善 18.73%,12 小时改善 20.27%,24 小时改善 27.65%。

Heinz Seder^[21]对不同类型的卫星钟进行分析,利用最小二乘频谱分析发现了 IGS 最终钟差产品在去除二次趋势项后还存在四个周期项,结果如下表所示:

表 1-1 主周期统计

Block/Clock	1 st max	2 st max	3 st max	4 st max
	Period(s)	Period(s)	Period(s)	Period(s)
II A/Cs	43140 ±11	21558 ±20	14358 ±25	10761 ±38
II A/Rb	43144 ±11	21571 ±8	14403 ±83	10778 ±7
II R/Rb	43136 ±14	21541 ±9	14409 ±113	10779 ±7
II R-M/Rb	43141 ±8	21548 ±17	14286 ±160	10780 ±4
Total	43140 ±12	21553 ±18	14381 ±98	10773 ±22

1.3 研究内容和意义

本文利用最小二乘频谱分析和快速傅里叶频谱分析方法主要研究了 IGS 分析中心提供的精密钟差和轨道数据和 IGS 最终精密钟差和轨道产品之间在去除系统性误差后的周期性差异，并对去除周期性差异前后数据进行了比较分析。

第一章：介绍了论文的研究背景，以及国内外的研究现状和研究进展。

第二章：详细介绍了 IGS 的组织结构和产品，阐述了精密单点定位的基本原理。分别利用分析中心产品和 IGS 最终产品进行单点定位的实例计算，从而比较两者在定位应用上存在的差异。

第三章：对分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品之间的差异进行了比较分析。通过原始数据做差，结果反映了分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品之间的差异；并对差异产生的原因进行了分析，发现两者之间的钟差和轨道产品均存在周期性差异。通过七参数坐标转换消除了分析中心与 IGS 最终轨道产品之间的系统性误差，比较了随机性偏差。

第四章：通过快速傅里叶变换频谱分析和最小二乘频谱分析的方法研究了两者差异中存在的周期项。比较了去除周期前后，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品差值的变化情况，这对进一步提高 IGS 产品综合的精度有重要意义。

第五章：对全文进行的研究工作进行了总结和归纳，并且对下一步需要进行的研究工作提出了自己的看法与展望。

第 2 章 IGS 及其产品概述

2.1 IGS 简介

自 1994 年成立以来,国际 GNSS 服务组织(The International GNSS Service) IGS 向全球免费提供高质量的 GNSS 数据产品, 这些产品使人们能够获得权威的全球参考框架, 从而为科研、教育以及商业应用提供支持, 这对全球用户来说有巨大的帮助, 同时也是支撑科研进步的关键元素。IGS 是一个由 100 多个国家的 200 多个自筹资金机构、大学和研究机构自愿联合组成的机构, 致力于提供全球最高精度的 GPS 卫星轨道等产品, 这些产品支持各种各样的应用, 几乎可以触及全球经济中所有领域的数百万用户, 并且生产支持国际地球参考框架的产品, 同时提供 400 多个全球基准站的跟踪数据, 并且通过工作组和试点项目, 不断开发出新的应用和产品, 同时是全球大地测量观测系统 (GGOS) 的一部分, 也是全球数据系统 (WDS) 的会员组织。

IGS 组织是为了支持大地测量与地球动力学研究, 经国际大地测量协会在 1993 年组建的国际协会组织。1994 年正式开始工作, 随后由于 GLONASS 等其它卫星导航系统的建成且投入运营, 国际 GPS 服务也扩大工作范围, 且改为国际 GNSS 服务。IGS 组织不断地为科研者提供各跟踪站的 GNSS 观测资料和 IGS 产品, 该组织提供高精度的精密星化并且力争缩短其获取的时间延迟。为国际地球参考架(ITRF)的建立, 国际 GNSS 服务组织提供了高精度的 GNSS 数据、产品和服务。IGS 通过收集 GPS 观测数据集, 来生成主要的 7 种产品, 这些收集的数据集精度较高, 能满足于科研领域和工程领域的应用研究。作为非盈利性的组织, 现在有 200 多个机构加入了该组织。直到 2017 年 12 月, IGS 有 400 多个跟踪站, 有超过 300 多个永久观测站, 能够进行 24 小时连续观测。IGS 组织现有 15 个数据中心, 其中全球性的 3 个, 区域性的 12 个。数据处理中心除了处理每天的观测数据之外, 还要计算卫星轨道参数等一系列产品。为了生成最终的卫星星历产品, 数据中心还要对来自各个数据处理中心的数据进行加权。

2.1.1 IGS 的宗旨

IGS 组织的宗旨就在于能够更好的共享 GNSS 数据, 能够实现 IGS 产品全球化, 将各种产品应用于众多领域, 如地震的监测。IGS 组织本着推广 GNSS 技术成为全球定位的规范, 不断的提高 IGS 产品的精度, 从而达到地球科学研

究的精度要求。IGS 组织不断的完善基础设施的建设，并管理好 IGS 组织的各个部口，从而达到各部口之间高效率运行。IGS 组织为了保证所有人都可使用 IGS 数据，也为了吸引科学研究者能加入该组织，一直坚持数据免费获取的准则。IGS 为了保障其产品的稳定性和高精度，制定了产品标准规范。IGS 为了推广市场，吸引更多人使用 IGS 的产品，一直把新技术引入 IGS 产品中。IGS 组织在不断的提高其产品对社会各个领域的科研集体的影响，而且它始终在促使其产品与全球大地测量观测系统的结合。

2.1.2 IGS 组成机构

IGS 组织主要由 6 个组织机构组成，它们分别是中央局，管理委员会，数据处理中也，数据分析中屯，跟踪站，基础设施委员会。各个部分的简要介绍如下：

(1) 管理委员会

管理委员会的组成是从 100 多个成员单位中选举的 16 位科学家组成，IGS 管理委员会执行政策制定与监督的功能，它负责 IGS 的全面管理和监督所 W 服务机构的工作，从而保障和维持组织高效稳定地运转。管理委员会的委员每届任期 2 年。

(2) 中央局

中央局设在美国加州喷气推进实验室内，管理委员会的策略和指示，需要它来实施完成，它也管理 IGS 组织每天的工作。中央局设置有一个专口管理 IGS 成员之间信息传输的部口，即中央局信息系统，简称 CBIS。中央局向 IGS 组织部口提供 IGS 机构与运行情况的信息，全球 GPS 跟踪网站信息，GPS 接收机和天线的全部说明等信息。中央局有促进 IGS 组织在全球的影响和促使 IGS 产品使用更加广泛的任务。

(3) 跟踪站

GPS 跟踪站都装备了采样率为 3 化的精密型双频 P 码的接收设备。目前，支持 IGS 的全球网观测基准站多达 300 多个，它们每天的管理和运营都是其建设部口的责任。这些观测站分布在全球范围内，通过网络传输数据。跟踪站通过不间断的跟踪运行，确保数据处理中也可以迅速获取数据。根据它们的作用范围，可以分为全球性网络，局域范围网络及区域范围网络。

(4) 数据处理中心

表 2-1 是 2017 年 IGS 的全部数据中心，由此表可知：现有 16 个运行数据中心、6 个全球性数据中心、7 个区域性数据中心和 1 个工程数据中心。其中，运行数据中心需要控制用户接收化收集的数据质量，而且它必须整理和保存用

户接收机的收集数据和最初数据，比如数据的卫星个数，用户接收机接收数据的开始时间等。运行数据中心必须将接收机接收到的最初数据转换成通用的 RINEX 格式，并且它必须在每天测量完成后的一个小时之内将数据压缩后传输到其余两个数据处理中也。运行数据中心和用户接收机接收数据是单向的关系，因为用户接收机只能间接的接收来自运行数据中心的数据，而运行数据中心必须一直获取用户接收机的测量数据。虽然运行数据中心有义务控制接收机的测量数据问题，但区域数据中心和全球数据中心也必须检核输入的数据是否存在质量问题。IGS 的三个数据中心必须尽可能长期的保存数据，其数据保存期限不低于 1 年。

表 2-1 2017 年 IGS 的全球数据中心

Global Data Center

Institution	Abbreviation	Country
Wuhan University	WHU	China
Institut Geographique National	IGN	France
Korean Astronomy and Space Science Institute	KASI	Korea
European Space Agency / ESAC	ESA / ESAC	Spain
Crustal Dynamics Data Information System	CDDIS	United States
Scripps Institution of Oceanography	SIO	United States

Regional Data Center

Institution	Abbreviation	Country
Geoscience Australia (formerly AUSLIG)	GA	Australia
Wuhan University	WHU	China
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	BKG (IfAG)	Germany
RDAAC-IRIS	RDAAC-IRIS	Russia
Hartebeesthoek Radio Astronomy Observatory	HRAO	South Africa
NGS/NOAA Operational Data Center	NGS/NOAA	United States
Jet Propulsion Laboratory	JPL	United States

Operational Data Center

Institution	Abbreviation	Country
Geoscience Australia (formerly AUSLIG)	GA	Australia
Geological Survey of Canada	PGC	Canada
Geodetic Survey of Canada	NRCAN	Canada
Kort & Matrikelstyrelsen/National Survey & Cadastre	KMS	Denmark

Centre National d'Etudes Spatiales	CNES	France
European Space Agency/ESOC	ESA/ESOC	Germany
GeoForschungsZentrum	GFZ	Germany
Hartebeesthoek Radio Astronomy Observatory	HRAO	Italy
Italian Space Agency	ASI	Italy
Geographical Survey Institute	GSI	Japan
Delft University of Technology	DUT	Netherlands
Norwegian Mapping Authority	SK	Norway
RDAAC-IRIS	RDAAC-IRIS	Russia
Jet Propulsion Laboratory	JPL	United States
NGS/NOAA Operational Data Center	NGS/NOAA	United States
Scripps Orbit and Permanent Array Center	SOPAC	United States

Project Data Center

Institution	Abbreviation	Country
Universite de La Rochelle > Tide Gauges & GPS	TIGA	France

(5) 数据分析中心

IGS 现有 11 个数据分析中心, 比较大型和核心的分析中心有 5 个, 分别是: 瑞士欧洲定轨中心(CODE)、德国欧洲空间工作局(ESA)、德国地球科学研究所(GFZ)、加州喷气动力实验室(JPL)和中国武汉大学测绘中心(WHU) [44]。瑞士欧洲定轨中心(CODE)主要研究的内容是连续的 GPS 导航系统和 GLONASS 导航系统的卫星轨道、地球自转参数、电离层数据(目前仅针对快速和最终数据)、GPS 卫星钟校准(目前仅针对快速和最终)以及跟踪站的坐标(目前仅针对最终数据)。将瑞士欧洲定轨中心的轨道数据与 IGS 最后发布的规矩相对比, 发现瑞士欧洲定轨中心的轨道数据在 Z 轴方向的偏差比较大。此外, 瑞士欧洲定轨中心提供的最终钟差数据也与 IGS 最终发布的最终钟差数据存在较大程度上的差异 [45]。在其他数据方面, 瑞士欧洲定轨中心的精度还是值得认可的。并且, 瑞士欧洲定轨中心还为 IGS 的 IGS-MGEX(Multi GNSS Experiment)工程做出了巨大的贡献。总的来说, 大部分情况下用户会使用瑞士欧洲定轨中心提供的各类数据, 这样方便了用户进行进一步的科研工作与实际应用, 意义是非常深远的。

德国欧洲空间工作局(ESA)位于德国的达姆斯塔特, 从 1992 年开始便为 IGS 提供数据上的支持服务。德国欧洲空间工作局主要研究的内容有最终 GNSS 产品、快速 GNSS 产品、超快速 GNSS 产品、实时 GNSS 服务以及 GNSS 传感器站。除了这些主要研究内容外, 德国欧洲空间工作局还活跃在各个方面, 例如卫星轨道建模等。德国欧洲空间工作局有着自己的特点, 是众多分析中心中比较好的一个, 它为 IGS 所提供的数据产品也是最完整的。

事实上,德国欧洲空间工作局是第一个提供一整套定轨和钟差产品的 IGS 分析中心。德国欧洲空间工作局所提供的快速产品,是精度最高也是最及时的,德国欧洲空间工作局在观测日后的两个小时内便能提供快速星历数据,而其他的分析中心则需要在观测日后的 17 个小时才能提供,这在一定程度上说明了德国欧洲空间工作局产品的可靠性。

德国地球科学研究所(GFZ)位于德国的波茨坦,是一所非大学所属的地球研究机构。德国地球科学研究所提供的数据种类很多,不仅包括了 GPS 导航系统和 GLONASS 导航系统的数据,还包括了 Galileo 导航系统和 BDS 导航系统的数据,并且还能够对 M-GEX 数据进行处理和分析。德国地球科学研究所自主升级了 EPOS-P8 软件用来处理数据,用来研究多系统数据分析。目前,德国地球科学研究所能够得到 BDS 导航系统提供的五颗地球静止轨道卫星(GEO),五颗倾斜地球同步观测卫星(IGSO)和四颗中轨道卫星(MEO)的轨道数据,所以德国地球科学研究所经常处理和分析 GPS+BDS 的数据。德国地球科学研究所处理轨道模型的经验非常丰富,所以德国地球科学研究所关于轨道的观测结果比其他分析中心的精度要高,其在 IGS 轨道分析中的权重也相应比较大。美国加州喷气动力实验室(JPL)主要为 GPS 卫星提供轨道和钟差数据,为各地面站提供位置、钟差以及对流层数据等,各地面站可利用美国加州喷气动力实验室提供的数据解算卫星的轨道和钟差,估计地球的旋转参数(白天的时长、极地运动以及极地运动率)。美国加州喷气动力实验室也为 IGS 提供 GPS 导航系统的超快速轨道和钟差产品,这些产品的延迟小于 2 小时并且都是每小时进行更新。美国加州喷气动力实验室使用的是 GIPSY/OASIS 软件来处理数据,从 GPS 的第 1738 周(2013 年 4 月 28 日)开始,美国加州喷气动力实验室开始使用 GIPSY/OASIS 的 6.2 版本。值得说明的是,美国加州喷气动力实验室使用的模型仍然是 GPS 太阳辐射压力模型而不是其他分析中心使用的基于 DYB 策略的模型,这也是基于实际情况考虑并且在软件上进行了测试对比最终做的决定,所以美国加州喷气动力实验室提供的数据有它自己的特点。近几年,美国加州喷气动力实验室的主要任务是对现有的 IGS 产品进行再加工处理。

中国武汉大学测绘中心(WHU)于 2012 年正式加入 IGS,是非欧美地区建立的首个 IGS 分析中心。中国武汉大学测绘中心使用的是其自主研发的 PANDA 软件来进行数据分析和处理,主要为 IGS 提供超快速和快速产品,包括 GPS 导航系统以及 GLONASS 导航系统卫星的定轨和钟差以及 EPRs。中国武汉大学测绘中心计算生成 GNSS 卫星厘米级超快速精密轨道与钟差产品,并提供给 IGS 组合生成官方产品。据 IGS 官方评测,中国武汉大学测绘中心产品质量在全球 9 家同类分析中心中排名前 3。中国武汉大学测绘中心是全球仅有的 3 个同时承

担 IGS 分析中心和 IGS 数据中心任务的研究机构之一，标志着中国武汉大学测绘中心已处于国际 GNSS 领先行列，将在国际高精度 GNSS 研究领域发挥着重要作用，做出更多贡献。中国武汉大学测绘中心虽然加入 IGS 中心的时间不长，但是对 GNSS 数据处理分析所做出的贡献是十分巨大的，期待中国武汉大学测绘中心有更大更好的发展。

(6) 基础设施委员会

为了满足更好精度的 IGS 产品的需求，IGS 组织必须保障建立好 IGS 观测网络，其中，保障 IGS 观测网的基础设备平稳且无故障运行又是基础设施委员会的职责和义务。只有在基础设施委员会的维护下，IGS 其余组织机构才能很好的运行。

2.1.3 IGS 星历数据产品

IGS 组织所生产的产品有：卫星星历数据，跟踪站的时钟信息，跟踪站的位置和速度，跟踪站的相位数据和伪距测量数据的 RINEX 格式，接收机的钟差数据，地球自转参数所有卫星的高质量轨道数据和预测轨道数据以及电离层对流层数据信息等。上述数据不仅可以满足定位和导航的精度要求，而且也为重要的科研项目提供了数据方面的支持，比如为卫星定轨提供高质量的数据等。卫星星历数据包含了卫星的位置，钟差数据信息，钟差数据的改正和说明信息，其中卫星钟差有四种不同类型的数据。

表 2-2 现有卫星星历数据对比图

星历类型	数据类型	精度	获取延迟	更新时间	采样率
广播星历	轨道	100cm	实时	实时	日
	钟差	均方根误差 (RMS): 5ns 标准偏差: 2.5ns			
超快星历（实际测量部分）	轨道	3cm	实时	00 点, 06 点, 12 点, 8 点	15 分钟
	钟差	均方根误差 (RMS): 150ps 标准偏差: 50ps			
超快星历（预测部分）	轨道	5cm	实时	00 点, 06 点, 12 点, 8 点	15 分钟
	钟差	均方根误差 (RMS): 3ns			

		标准偏差: 1.5ns			
快速星历	轨道	2.5cm	17-41 小时	17UTC	15 分钟, 5 分钟
	钟差	均方根误差 (RMS): 75ps 标准偏差: 25ps			
最终星历	轨道	2.5cm	12-18 天	每周二	15 分钟, 5 分钟, 30 秒
	钟差	均方根误差 (RMS): 75ps 标准偏差: 20ps			

2.2 分析中心与 IGS 最终产品 PPP 精度对比

IGS 各分析中心独立解算并发布精密钟差和轨道产品, IGS 通过综合各个分析中心的产品得到 GPS 卫星轨道、钟差等综合产品, 并将这些产品发送给全球资料中心和中央局的信息中心, 免费提供给用户使用, 通常情况下, 分析中心产品提交后的一至两天, 可以获取 IGS 综合后的产品。

为分析两者在定位精度上的差异, 本节介绍了精密单点定位原理, 对分析中心精密钟差和轨道产品和 IGS 最终产品的定位精度进行对比。

2.2.1 精密单点定位数学模型

GPS 精密单点定位是一种获得高精度 ITRF 框架下坐标的定位方法, 主要是利用 IGS 上发布的高精度卫星轨道以及钟差产品, 结合 GPS 接收机的双频载波相位观测值来实现的^[22]。到目前为止, GPS 精密单点定位的观测模型有许多, 主要分为无电离层组合模型、Uofc 模型以及非组合模型这三大类^[23]。在这三类模型中, 使用最多的是无电离层组合模型。下面将对这三类模型进行简单的介绍。

(1) 无电离层组合模型

GPS 精密单点定位的无电离层组合模型的简化模型如下所示^[24]:

$$P_3 = \frac{f_1^2 p_1 - f_2^2 p_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c(dt'_r - dt^{s'}) + T + \varepsilon_{P_3}$$

$$\phi_3 = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c(dt'_r - dt^{s'}) + T + \lambda_3 N'_3 + \varepsilon_{\phi_3}$$
(2-1)

其中:

下标中的数字分别表示各载波相位观测值的频段, 字母分别对应接收机和 GPS 卫星;

c 表示在真空中的光速;

dt'_r 表示吸收了接收机硬件延迟的接收机钟差;

dt^s 表示包含了无电离层组合卫星硬件延迟的卫星钟差；

T 表示对流层延迟影响；

ε 表示未模型化的误差影响；

P_3 、 ϕ_3 分别表示伪距和载波无电离层组合观测值；

ρ 表示信号发射时刻卫星位置与信号接收时刻接收机位置之间的几何距离；

λ_i 、 f_i 分别表示相应的 L_i 载波的波长和频率；

N_3' 表示无电离层组合中包含初始相位偏差的非整模糊度。

由简化模型可以看出，电离层一阶影响是可以消除的，但是由于卫星硬件条件所引起的延迟是不能够被消除的。IGS 所发布的高精度轨道和钟差产品中已经消除了由于卫星硬件所产生的延迟情况，所以在 GPS 精密单点定位中使用 IGS 提供的产品时是不需要考虑由于硬件所引起的延迟的，同时由于接收机硬件产生的延迟将会被接收机的钟差所吸收。

(2)Uofc 模型

GPS 精密单点定位 Uofc 模型是一种消电离层组合模型，是由加拿大教授提出的。其简化模型如下所示：

$$\begin{aligned} P_{3,P_1} &= \frac{1}{2}(P_1 + L_1) = \rho + c(dt - dT) + T + 0.5\lambda_1 B_1 + \delta m + \varepsilon_{(P_1, L_1)} \\ P_{3,P_2} &= \frac{1}{2}(P_2 + L_2) = \rho + c(dt - dT) + T + 0.5\lambda_2 B_2 + \delta m + \varepsilon_{(P_2, L_2)} \end{aligned} \quad (2-2)$$

其中大部分符号表示含义同上，其余如下所示：

B 表示双频无电离层组合模糊度；

δm 表示组合相位观测值的多路径效应；

dt 表示接收机钟差；

dT 表示卫星钟差；

ε_p 表示组合伪距观测噪声；

ε_L 表示组合相位观测噪声；

GPS 精密单点定位 Uofc 模型利用电离层延迟在载波相位的观测值和测码伪距值数量上相等、符号上相反的特点，来消除电离层的延迟偏差，通过这种方法使得伪距观测的噪声减半^[25]。但是 Uofc 模型不能消除 L_1 与 L_2 两个不同载波频率上的频间码差以及频间相位差。同样，IGS 发布的高精度卫星轨道和钟差产品已经消除了这种偏差，如果利用 IGS 发布的产品则不用考虑上述偏差。

(3)非组合模型

GPS 精密单点定位非组合模型的简化模型如下所示^[26]：

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \rho + c(dt - dT) + T + I_{L_1} + dm_{P_1} + \varepsilon_{P_1} \\
 P_2 &= \rho + c(dt - dT) + T + \gamma I_{L_1} + dm_{P_2} + \varepsilon_2 \\
 L_1 &= \rho + c(dt - dT) + T - I_{L_1} + \lambda_1 B_1 + \delta m_{L_1} + \varepsilon_{L_1} \\
 L_2 &= \rho + c(dt - dT) + T - \gamma I_{L_2} + \lambda_2 B_2 + \delta m_{L_2} + \varepsilon_{L_2}
 \end{aligned}
 \tag{2-3}$$

其中， I_{L_1} 表示 L_1 载波观测值上的电离层延迟误差，单位为米，其他符号同上。

非组合模型与上述两类模型一样，都需要利用 IGS 发布的产品来减少偏差。

2.2.2 精密单点定位误差来源

精密单点定位主要误差来源可以分为三类^[27]，具体如误差来源如下表所示：

表 2-3 精密单点定位主要误差来源

与卫星有关的误差	卫星轨道误差
	卫星钟误差
	卫星天线相位中心偏差误差
与信号传播路径有关的误差	相对论效应
	相位绕转
	对流层延迟误差
	电离层延迟误差
	多路径效应引起的误差
与接收机和测站有关的误差	接收机钟差
	接收机天线相位中心偏差误差
	固体潮沙
	海洋潮汐
	地球自转
	接收机端硬件延迟误差
	测量噪声

根据上述表格，对误差来源进行具体的分析：

(1) 与卫星有关的误差

卫星轨道误差是指与轨道真实值之间的误差。IGS 发布的最终星历产品的精度已经优于 2.5 厘米，因此在精密单点定位中使用 IGS 最终星历产品可以减弱卫星轨道误差带来的影响。对于卫星钟误差也是同样的道理，IGS 发布的精密卫星钟差产品的精度已经优于 0.1ns，所以使用 IGS 发布的精密卫星钟差产品可以减弱卫星钟误差带来的影响。

卫星天线相位中心偏差是指卫星天线的质量中心和相位中心之间的偏差，在使用 IGS 精密星历进行精密单点定位时需要同时对卫星天线相位中心偏差进行改正^[28]。

卫星钟相对论效应是由于运动速度和重力位的不同而引起的卫星钟和接收机钟之间产生相对钟误差的现象^[29]。由相对论效应引起的误差可以由以下公式进行改正：

$$\Delta_{rel} = -\frac{2}{c} \mathbf{X}^s \cdot \dot{\mathbf{X}}^s \quad (2-4)$$

式中， \mathbf{X}^s 表示卫星的位置向量， $\dot{\mathbf{X}}^s$ 表示卫星的速度向量。

相位绕转是因为卫星天线或接收机天线旋转运动而产生的相位观测值的改变。由相位绕转引起的误差可以由以下模型改正^[30]：

$$\delta\phi = \text{sign}(\xi) \cos^{-1}(\vec{D} \cdot \vec{D} / |\vec{D}| |\vec{D}|) \quad (2-5)$$

式中：

$$\xi = \vec{k} \cdot (\vec{D} \cdot \vec{D}); \quad \vec{D} = \vec{x} - \vec{k}(\vec{k} \cdot \vec{x}) - \vec{k} \times \vec{y}; \quad \vec{D} = \vec{x} - \vec{k}(\vec{k} \cdot \vec{x}) + \vec{k} \times \vec{y}; \quad \vec{k} \text{ 是卫星}$$

到接收机方向的单位向量； (x, y, z) 表示卫星坐标的单位向量； (x, y, z) 表示测站坐标向量。

(2)与信号传播路径有关的误差

信号在穿过大气电离层的时候，传播速度和方向都会变化，产生的这种偏差就是电离层延迟误差。通常采用电离层延迟改正模型例如电离层格网模型、克罗布歇模型等^[31]。

对流层延迟产生的误差可以利用已有模型改正对流程延迟的干分量，使用随机模型估计天顶对流层湿延迟，然后通过投影函数将其投影到卫星信号传播路径的方向上^[32]。对流层改正的模型如下：

$$\Delta\rho_{trop} = d_{dry} \cdot MF_{dry} + d_{wet} \cdot MF_{wet} \quad (2-6)$$

式中， d_{dry} 、 d_{wet} 分别表示天顶对流层干分量延迟和湿分量延迟， MF_{dry} 、 MF_{wet} 分别表示干分量投影函数和湿分量投影函数。

对于多路径效应引起的误差目前还没有比较有效的解决方法，一般都是采用削弱的措施，比如适当延长观测的时间、选择合适的测站地址等。

(3)与接收机和测站有关的误差

接收机一般采用的是石英钟，稳定性比较差，且变化规律复杂，在精密单点定位中将接收机的钟差当成是一组白噪声处理，认为历元之间的接收机钟差是互相独立的。接收机相位中心偏差是指通过接收机测量出的中心与天线参考点(ARP)两点位置不重合所产生的偏差^[33]。在精密单点定位中，必须要考虑这种偏差。

固体潮汐是指在太阳、月球等摄动天体的万有引力下，弹性地球表面会产生周期性的涨落的现象，其导致的测站位移值在世界范围内最大可达 60cm。由于 ITRF 坐标系没有考虑固体潮对测站的影响，在精密单点定位中必须对固体潮进行分析研究^[34]。

海洋潮汐是由于潮汐的周期性涨落引起的。其改正模型为：

$$\Delta R_{ocean} = \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} A_i^r \cos(\omega_i t + \phi_i - \delta_i^r) \\ A_i^{EW} \cos(\omega_i t + \phi_i - \delta_i^{EW}) \\ A_i^{NS} \cos(\omega_i t + \phi_i - \delta_i^{NS}) \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

式中：

t 表示以秒记的世界时；

ω_i 表示分潮波的频率；

ϕ_i 表示历元时刻的天文幅角；

N 表示阶数；

A_i^r 、 A_i^{EW} 、 A_i^{NS} 分别表示潮波径向、东南方向和南北方向的幅度；

δ_i^r 、 δ_i^{EW} 、 δ_i^{NS} 分别表示相对格林子午线相位滞后的情况。

地球自转所产生的误差是由于卫星信号发射时刻与接收机信号的接受时刻所对应的地固系不同而产生的^[35]。由于地球自转引起的偏差可由以下公式改正：

$$\Delta Dw = \frac{w}{c} [Y_S (X_R - X_S) - X_S (Y_R - Y_S)] \quad (2-8)$$

式中：

X_R 、 Y_R 表示测站的坐标；

X_S 、 Y_S 表示卫星的坐标；

w 表示地球自转的角速度；

c 表示光在真空中的速度。

2.2.3 精度对比

精密钟差和轨道数据采用 JPL、EMR、ESA 三个分析中心的精密钟差和轨道产品以及 IGS 的最终产品,观测数据采用北京房山(BJFS)、上海佘山(SHAO)、武汉(WUHN)三个 IGS 站的观测文件,以天为单位,计算了 2013 年年积日为 272 至 285 共 14 天的上述三个站的 PPP 解。

以 IGS 最终精密钟差和轨道产品解算的结果作为参考值,将其余三个分析中心产品的解算结果转换到 NEU 方向,结果如下图所示：

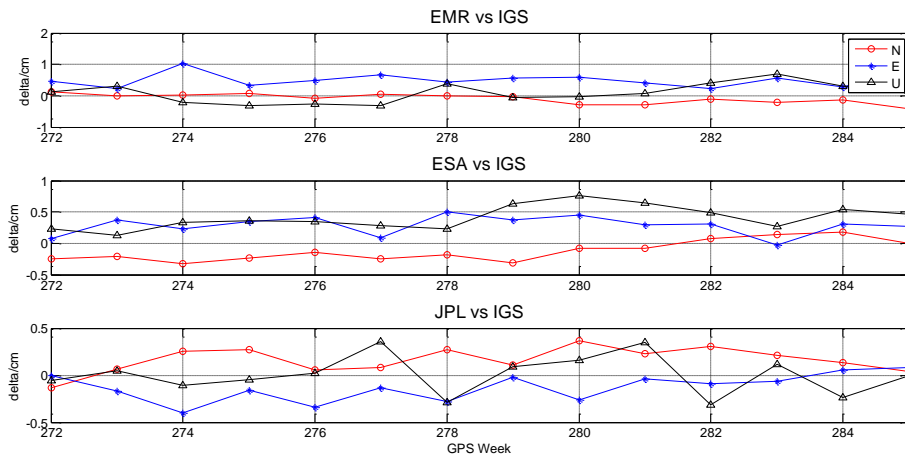


图 2-1 BJFS 站 PPP 定位结果

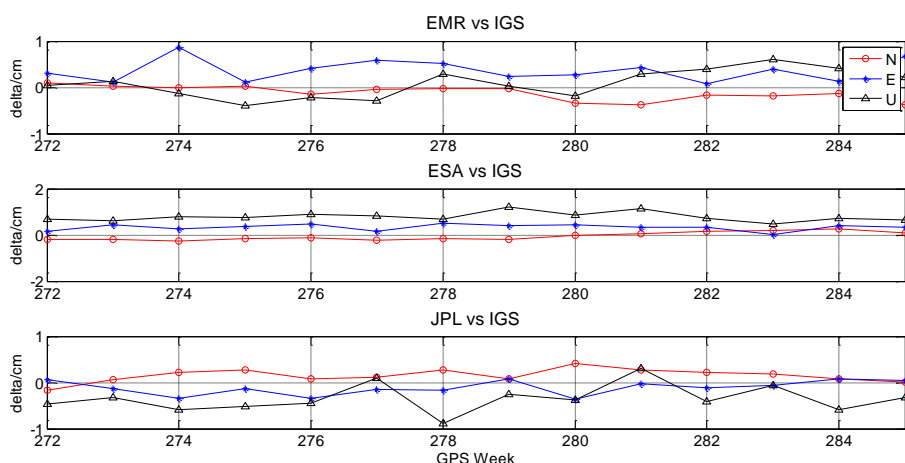


图 2-2 SHAO 站 PPP 定位结果

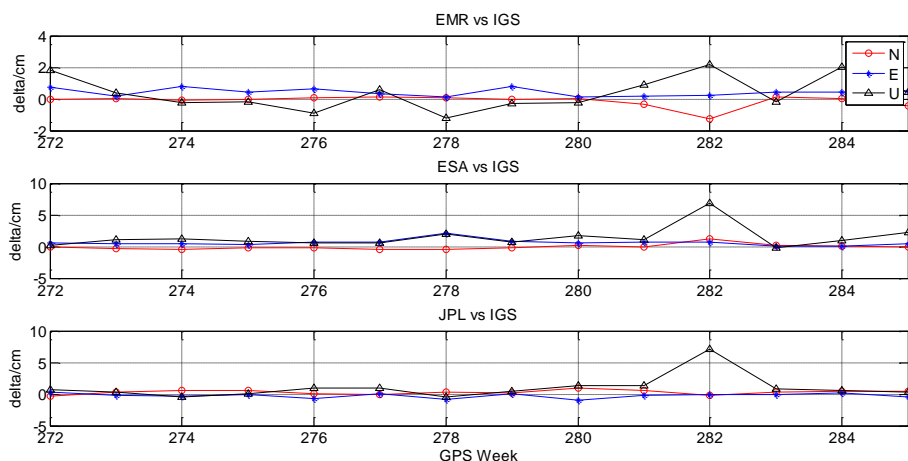


图 2-3 WUHN 站 PPP 定位结果

对各测站 NEU 三个方向的均值和标准差进行统计，结果如下表：

表 2-4 BJFS 站统计结果

测站	均值 (cm)			标准差 (cm)		
	N	E	U	N	E	U
EMR vs IGS	-0.095	0.511	0.092	0.158	0.225	0.306
ESA vs IGS	-0.119	0.288	0.408	0.162	0.149	0.187
JPL vs IGS	0.161	-0.132	0.006	0.134	0.147	0.207

表 2-5 SHAO 站统计结果

测站	均值 (cm)			标准差 (cm)		
	N	E	U	N	E	U
EMR vs IGS	-0.122	0.370	0.087	0.156	0.26	0.300
ESA vs IGS	-0.057	0.330	0.783	0.174	0.138	0.196
JPL vs IGS	0.153	-0.111	-0.346	0.146	0.152	0.300

表 2-6 WUHN 站统计结果

测站	均值 (cm)			标准差 (cm)		
	N	E	U	N	E	U
EMR vs IGS	-0.126	0.422	0.372	0.373	0.249	1.047

ESA vs IGS	-0.053	0.624	1.406	0.418	0.480	1.689
JPL vs IGS	0.287	-0.224	1.002	0.334	0.378	1.826

从统计结果可以看出，对于 BJFS 站、SHAO 站以及 WUHN 站而言，使用分析中心精密钟差和精密轨道数据与使用 IGS 最终产品的精密单点定位结果，在 NEU 三个方向上的差值均未超过 1cm，说明同一分析中心的轨道和钟差产品具有一致性和自洽性，用户完全可以使用单个分析中心的成套数据进行精密单点定位计算。

2.3 小结

本章详细介绍了 IGS 的组织结构和产品，阐述了精密单点定位的基本原理，并分别利用分析中心产品和 IGS 最终产品进行单点定位的实例计算，从而比较两者在定位应用上存在的差异。实际计算结果表明，采用分析中心的精密钟差和轨道产品与采用 IGS 最终产品的静态精密单点定位结果在 NEU 三个方向的差异均不超过 1cm，表明了同一分析中心的轨道和钟差产品具有一致性和自洽性。

第3章 分析中心与 IGS 产品初步分析

分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品之间,存在系统性和随机性误差,为研究两者差异的特性,本章通过坐标转换和作差等方式去除系统性误差,对分析中心与 IGS 产品进行初步分析。

3.1 数据简介

IGS 分析中心在 2009 年和 2013 年对全球网络内 IGS 站的 GNSS 数据分别进行了两次数据重处理,解算得到的数据分别称为重处理数据 1 (repro1) 和重处理数据 2(repro2),其中 repro1 为 1994 年至 2007 年的重处理数据, repro2 为 1994 年至 2013 年(包括部分 2014 年)的重处理数据。进行重处理的目的是统一采用最新的模型和处理方法对 IGS 站的数据进行解算,从而得到具有完全一致性的 IGS 产品集。

将 EMR、ESA、JPL 三个分析中心以及 IGS 最终的精密钟差和精密轨道产品作为研究对象,EMR、ESA、JPL 分别与 IGS 作比较,分为三组进行两两比较,即:EMR vs IGS、ESA vs IGS、JPL vs IGS。为了尽可能削弱各分析中心不同解算模型和方法带来的系统性误差,本文采用的是上述四个分析中心的 repro2 数据,从 IGS 全球数据中心——CDDIS 下载获取了 ESA、EMR 和 JPL 分析中心以及 IGS 最终产品 2013 年 GPS 时为 1760 周至 1769 周精密钟差数据和精密轨道数据,本文所有下载的精密钟差数据时间间隔均为 5 分钟,精密轨道数据时间间隔均为 15 分钟。

3.1 精密钟差产品分析

理论上不同 IGS 分析中心提供的同一颗卫星的精密钟差数据应该相同,但不同分析中心选取的参考钟不同,即时间基准不一致,导致来自不同分析中心的同一颗卫星的精密钟差数据产生差异,这一差异反映了两分析中心之间的时间基准差异,分析中心与 IGS 最终产品之间也存在系统性误差。为消除系统误差,对下载的精密钟差数据进行如下处理:首先,将同一历元下来自分析中心和 IGS 的相同卫星的钟差数据作差;最后,以一颗卫星为基准求出其他卫星钟差数据作差后的值与该基准卫星的钟差数据差值的差。处理过程可表示为式 (3-1) 和式 (3-2)。

$$\Delta\Delta T_i^j = \Delta T_i^j(\text{AC}) - \Delta T_i^j(\text{IGS}) \quad (3-1)$$

$$\Delta\Delta T_i^{j'} = \Delta\Delta T_i^j - \Delta\Delta T_i^{\text{BAS}} \quad (3-2)$$

式中, $\Delta T_i^j(*)$ 表示*分析中心或 IGS 的第*i*个历元第*j*颗卫星的钟差。

经过上述预处理后,精密钟差数据中的系统性误差被消除,对预处理后的

精密钟差数据进行分析即可研究钟差差异的随机特性。

以 PRN01、PRN05、PRN10、PRN15 卫星为例，采用 2013 年 1760 周的数据，以 IGS 精密钟差产品为基准，分析中心 EMR、ESA、JPL 的精密钟差与其做一次差，结果如下图：

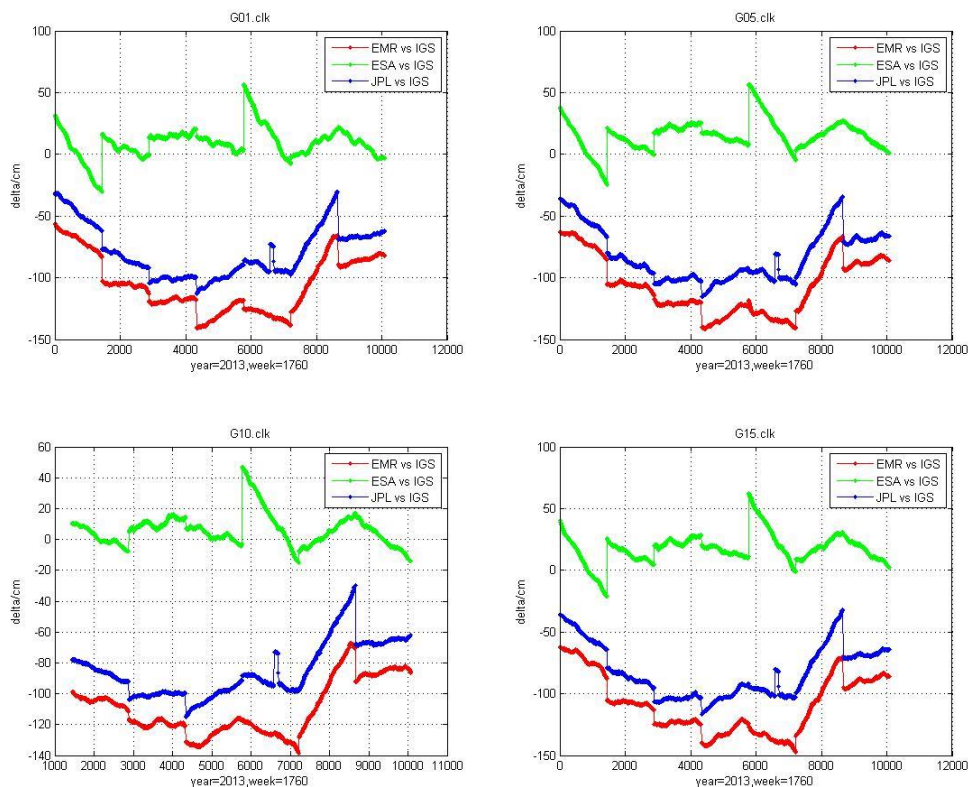


图 3-1 做一次差结果

从图中可以看出，各分析中心和 IGS 最终产品做一次差后，结果存在系统性偏差。理论上不同 IGS 分析中心提供的同一颗卫星的精密钟差数据应该相同，但不同分析中心选取的参考钟不同，即时间基准不一致，导致来自不同分析中心的同一颗卫星的精密钟差数据产生差异，这一差异反映了两分析中心之间的时间基准差异，正是由于这种差异导致了图中系统性偏差的结果；

另外，从图中还可以看出就某个分析中心与 IGS 最终产品作差结果而言，以天为单位有趋势项的存在，且会出现跳变，为消除这种差异只保留随机性误差，再以 PRN01 卫星为基准做两次差，结果如下图：

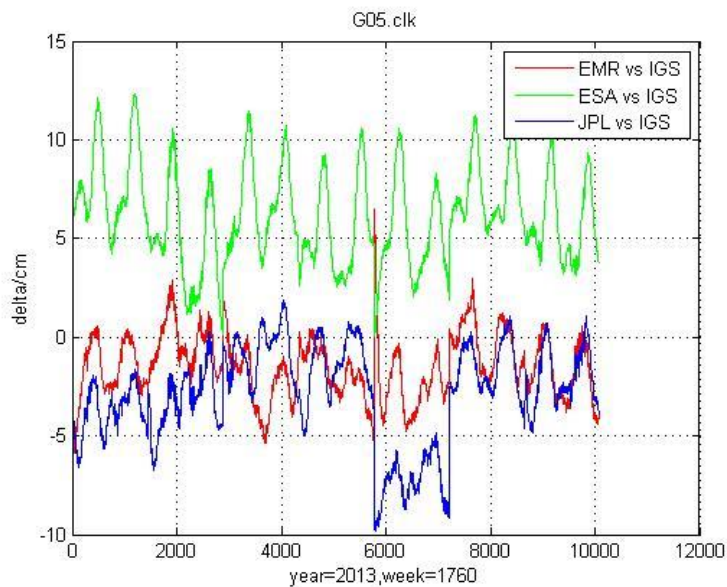


图 3-2 G05 钟差做两次差

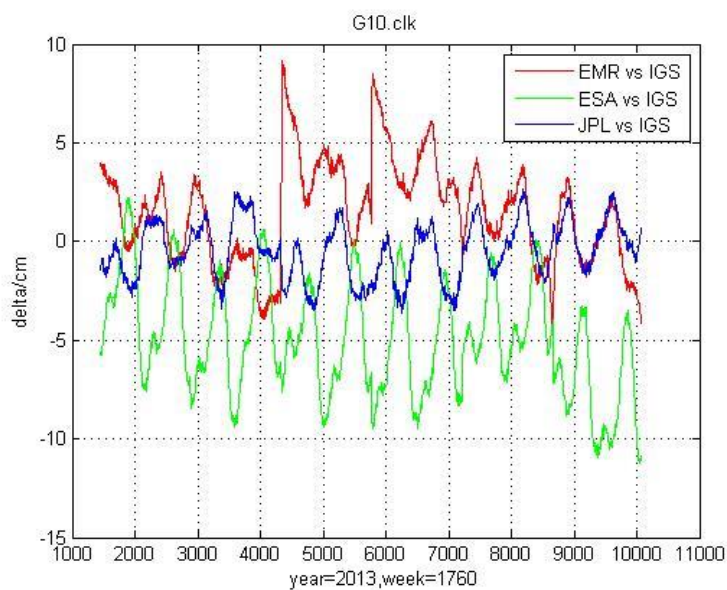


图 3-3 G10 钟差做两次差

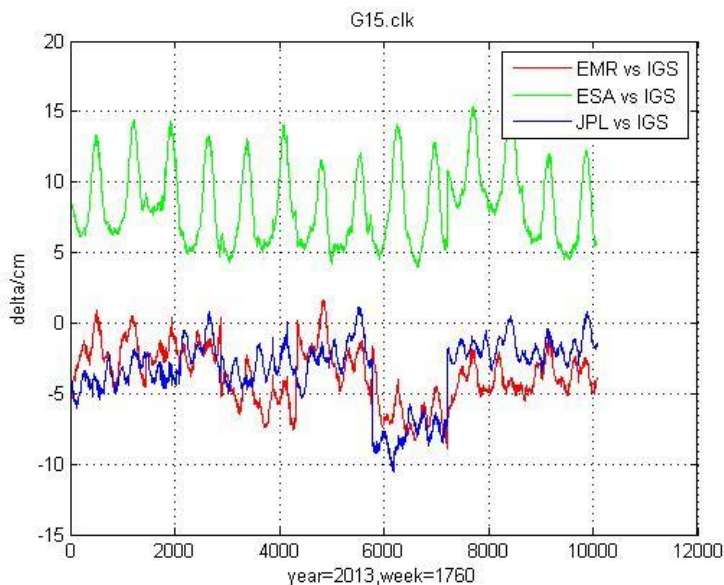


图 3-4 G15 钟差做两次差

从图中可以看出，做两次差后结果呈现一定的周期性，说明分析中心钟差产品与 IGS 最终钟差产品之间存在周期性差异和系统差异。

3.2 精密轨道产品分析

3.2.1 差异特性

不同 IGS 分析中心提供的精密轨道数据中，同一颗卫星在同一历元 T 下的空间坐标应该相同，但由于 IGS 不同分析中心选取的坐标框架及模型不同，导致分析中心 a 提供的卫星 A 在历元 T 时的空间坐标与分析中心 b 提供的卫星 A 在历元 T 时的空间坐标并不相同，它们之间的差异即反映了两分析中心坐标框架及模型的差异，IGS 综合后的轨道产品与单个分析中心产品之间也存在系统性误差。

卫星位置在协议地固坐标系中更易描述，因此 IGS 精密轨道数据中卫星的空间坐标是卫星在协议地固坐标系中的坐标，但是这种坐标不便于研究卫星的轨道特性，为了研究不同分析中心间精密轨道差异的特性，需要将协议地固系下的卫星坐标矢量转换到 RTN 坐标系下，转换后得到的 R 分量即为卫星在其轨道平面内的径向值。然后，在同一历元下，将来自分析中心和 IGS 的相同卫星的精密轨道 R 分量数据作差，从而消除系统性误差。

将卫星坐标转换为卫星轨道径向值，需要先通过拉格朗日插值求卫星速度矢量，再从协议地固坐标系转换至 RTN 坐标系^[36]：

1) 拉格朗日插值求卫星速度矢量

为了将星历中的卫星坐标转换为卫星轨道径向值，需要求出卫星在每一历元下的瞬时速度 v 。将星历中每个历元下的卫星坐标矢量 r 用拉格朗日插值法写为历元 t 的函数 $r(t)$ ，对 $r(t)$ 求导即可得到卫星速度矢量 v 关于 t 的函数 $v(t)$ ^[37]。

本文中选用 t 时刻前后各 5 个历元的精密轨道数据对 t 时刻的卫星坐标

进行拉格朗日插值，选取的基函数为：

$$l_i(t) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{(t - t_j)}{(t_i - t_j)} \quad (i=0, \dots, n) \quad (3-3)$$

则卫星坐标关于 t 的函数 $r(t)$ 如下：

$$r(t) = \sum_{i=0}^n r_i \cdot l_i(t) \quad (3-4)$$

对上述卫星坐标矢量的函数 $r(t)$ 求导得到卫星速度矢量的函数 $v(t)$ 为：

$$v(t) = \sum_{i=0}^n r_i \cdot \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^n \frac{1}{(t_i - t_k)} \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i, j \neq k}}^n \frac{(t - t_j)}{(t_i - t_j)} \quad (3-5)$$

2) 从协议地固坐标系转换至 RTN 坐标系

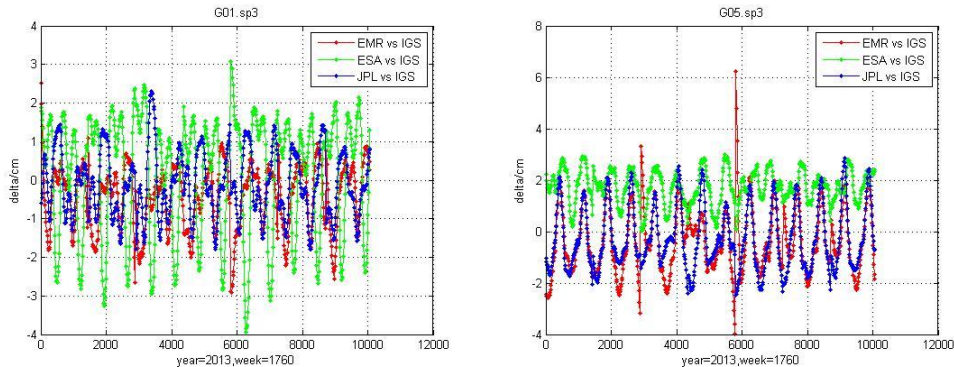
卫星位置在协议地固坐标系中更易描述，因此 IGS 精密轨道数据中卫星的空间坐标 (x, y, z) 是卫星在协议地固坐标系中的坐标，这种坐标不便于研究卫星的轨道特性，为了研究不同分析中心间精密轨道差异的特性，需要将协议地固系下的卫星坐标矢量转换到 RTN 坐标系下，转换后得到的 R 分量即为卫星在其轨道平面内的径向值。由(3-5)式求出卫星的速度矢量后即可利用式(3-6)的转换矩阵将卫星在协议地固坐标系下的坐标矢量 (x, y, z) 转化为卫星轨道平面内的坐标矢量 (R, T, N) 。

$$G(1, :) = \begin{matrix} \rightarrow \\ r \\ | r | \end{matrix}$$

$$G(3, :) = - \frac{\begin{matrix} \rightarrow & \rightarrow \\ r \times v \\ | r \times v | \end{matrix}}{\begin{matrix} \rightarrow & \rightarrow \\ r \times v \\ | r \times v | \end{matrix}} \quad (3-6)$$

$$G(2, :) = G(1, :) \times G(3, :)$$

以 PRN01、PRN05、PRN10、PRN15 为例，采用 2013 年 1760 周的数据，将卫星坐标转换为卫星轨道径向值，以 IGS 精密轨道产品为基准，分析中心 EMR、ESA、JPL 的精密轨道与其做一次差：



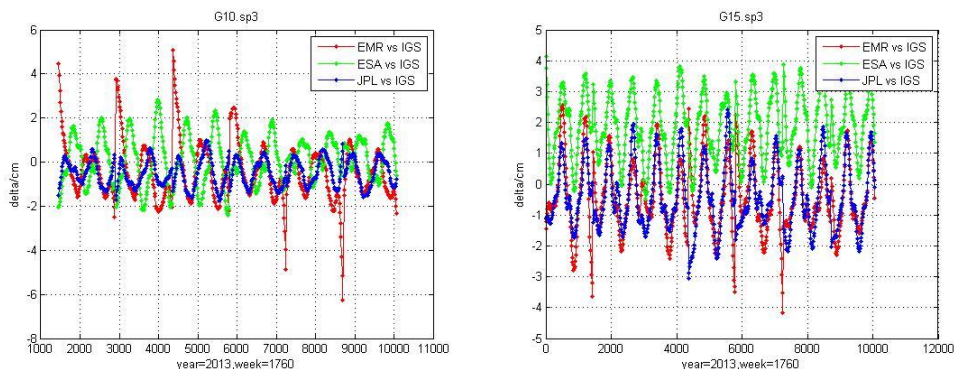


图 3-5 轨道做一次差

由上图可以看出，不同分析中心提供的精密轨道与 IGS 最终轨道产品作差结果仍存在系统性误差，这是由于 IGS 不同分析中心选取的坐标框架及模型不同；另外，就单个分析中心而言，作差结果呈现一定的周期性，说明了分析中心的轨道产品与 IGS 最终精密轨道产品之间也存在周期性差异。

3.2.2 坐标转换法去除系统误差

针对分析中心与 IGS 轨道产品之间的差异，可以采用七参数转换模型计算分析中心与 IGS 轨道坐标之间的转换参数，从而消除产品间的系统性偏差。本小节介绍了此方法的基本原理，进行了实际计算，并对其在预报中的应用进行了研究。



图 3-6 两个坐标系

如上图所示，若在坐标系 $o-xyh$ 中观测了 n_1 个点，在坐标系 $o'-x'y'h'$ 中观测了 n_2 个点，其中有 n ($n \leq n_1, n \leq n_2$) 个公共点，分别表示为 $(x_i \ y_i \ h_i)^T$ 和 $(x'_i \ y'_i \ h'_i)^T$ ($i=1,2,\dots,n$)。

则两种坐标系之间对应点坐标之间的转换关系为^[38]：

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ h_0 \end{pmatrix} + (1+K)\mathbf{R}_1(\alpha)\mathbf{R}_2(\beta)\mathbf{R}_3(\gamma) \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ h' \end{pmatrix} \quad (3-7)$$

式中的 $(x_0 \ y_0 \ h_0)$ 为平移量， K 为尺度参数， $\mathbf{R}_1(\alpha)$ 、 $\mathbf{R}_2(\beta)$ 、 $\mathbf{R}_3(\gamma)$ 为

旋转矩阵。

误差方程式为：

$$\mathbf{v}_i = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ h_0 \end{pmatrix} + (1+K)\mathbf{R}_1(\alpha)\mathbf{R}_2(\beta)\mathbf{R}_3(\gamma) \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ h'_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ h_i \end{pmatrix} \quad (3-8)$$

误差方程也可表示为：

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{L} \quad (3-9)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial (x_0 \ y_0 \ h_0)^T} & \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial K} & \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial \alpha} & \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial \beta} & \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial (x_0 \ y_0 \ h_0)^T} = \mathbf{I} \quad (3-11)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial K} = \mathbf{R}_1(\alpha^0)\mathbf{R}_2(\beta^0)\mathbf{R}_3(\gamma^0) \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ h'_i \end{pmatrix} \quad (3-12)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial \alpha} = \frac{\partial \mathbf{R}_1(\alpha)}{\partial \alpha} \mathbf{R}_2(\beta)\mathbf{R}_3(\gamma) \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ h'_i \end{pmatrix}, \quad \frac{\partial \mathbf{R}_1(\alpha)}{\partial \alpha} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(\alpha^0) & -\cos(\alpha^0) \\ 0 & \cos(\alpha^0) & -\sin(\alpha^0) \end{pmatrix}$$

(3-13)

$$\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial \beta} = \mathbf{R}_1(\alpha) \frac{\partial \mathbf{R}_2(\beta)}{\partial \beta} \mathbf{R}_3(\gamma) \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ h'_i \end{pmatrix}, \quad \frac{\partial \mathbf{R}_2(\beta)}{\partial \beta} = \begin{pmatrix} -\sin(\beta^0) & 0 & -\cos(\beta^0) \\ 0 & 0 & 0 \\ \cos(\beta^0) & 0 & -\sin(\beta^0) \end{pmatrix} \quad (3-14)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial \gamma} = \mathbf{R}_1(\alpha)\mathbf{R}_2(\beta) \frac{\partial \mathbf{R}_3(\gamma)}{\partial \gamma} \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ h'_i \end{pmatrix}, \quad \frac{\partial \mathbf{R}_3(\gamma)}{\partial \gamma} = \begin{pmatrix} -\sin(\gamma^0) & -\cos(\gamma^0) & 0 \\ \cos(\gamma^0) & -\sin(\gamma^0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3-15)$$

$$\mathbf{L} = - \begin{pmatrix} x_0^0 \\ y_0^0 \\ h_0^0 \end{pmatrix} - \mathbf{R}_1(\alpha^0)\mathbf{R}_2(\beta^0)\mathbf{R}_3(\gamma^0) \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ h'_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ h_i \end{pmatrix} \quad (3-16)$$

使用 2013 年 09 月 29 日至 10 月 12 日共 14 天的数据, 对于 PRN11 号卫星分别计算分析中心: EMR、ESA、JPL 与 IGS 最终轨道产品之间的转换参数,

然后利用转换参数进行坐标转换，转换前后轨道残差如下图所示：

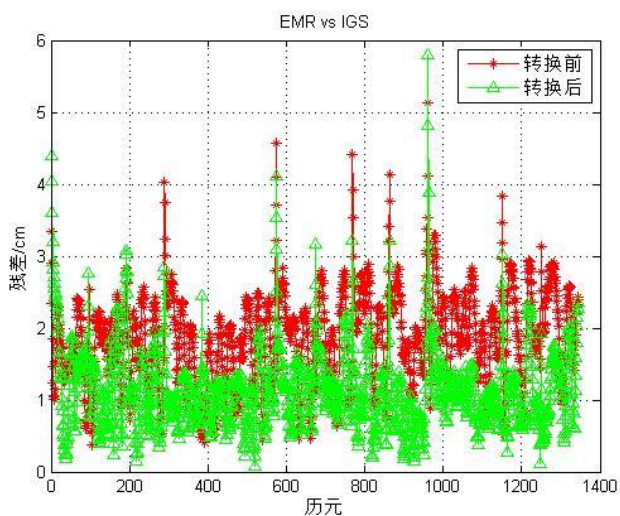


图 3-7 EMR vs IGS

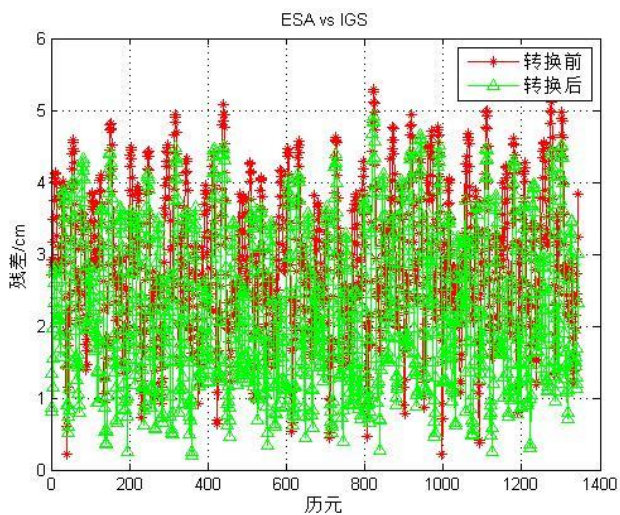


图 3-8 ESA vs IGS

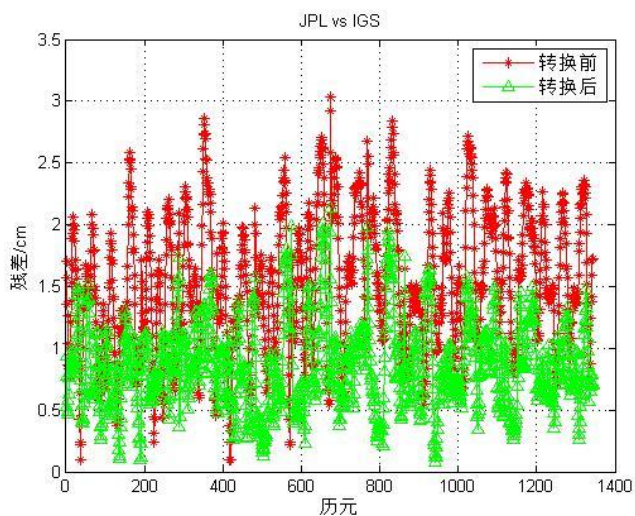


图 3-9 JPL vs IGS

各分析中心与 IGS 最终轨道之间残差的平均值与 RMS，如下表：

表 3-1 残差平均值与 RMS

分析中心	平均值 (cm)			RMS (cm)		
	转换前	转换后	变化量	转换前	转换后	变化量
EMR vs IGS	1.866	1.153	0.713	0.054	0.035	0.019
ESA vs IGS	2.909	2.295	0.614	0.084	0.069	0.015
JPL vs IGS	1.535	0.866	0.669	0.044	0.026	0.019

由上表易知，通过坐标转换，去除分析中心与 IGS 最终轨道间系统误差的方法，能使一定程度减小两者残差平均值和 RMS，其中平均值能够减小 60mm~70mm，RMS 能够减小 1mm~2mm。

由于单个分析中心和 IGS 最终轨道产品之间的差异特性，在时间维度上存在延续性，利用这 14 天数据求得的转换参数，将三个分析中心 2013 年 10 月 13 日至 10 月 26 日共 14 天的轨道数据进行坐标转换，转换前后与 IGS 最终轨道的残差如下图所示：

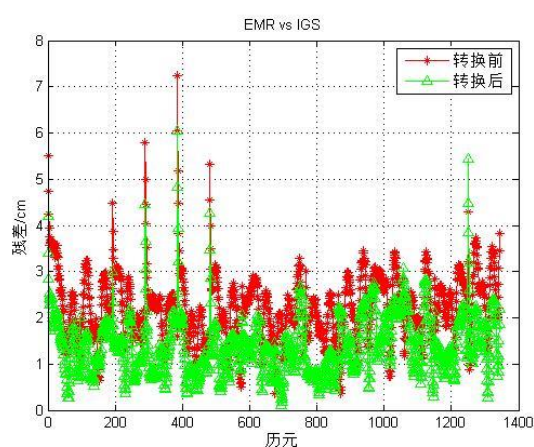


图 3-10 EMR vs IGS

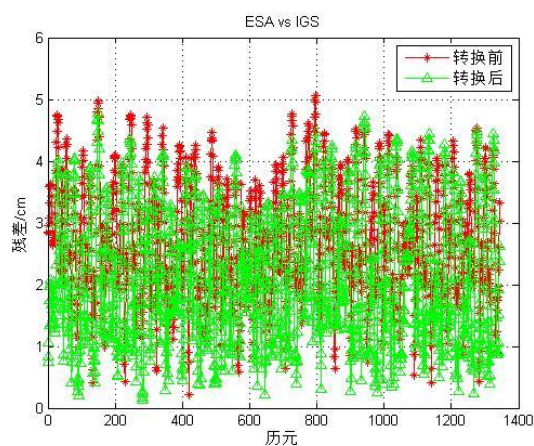


图 3-11 ESA vs IGS

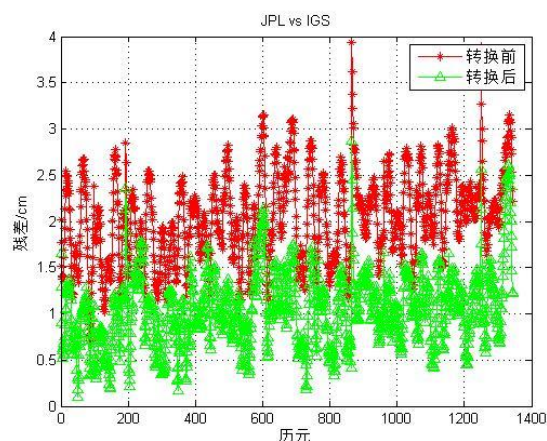


图 3-12 JPL vs IGS

残差的平均值与 RMS，如下表：

表 3-2 残差平均值与 RMS

分析中心	平均值 (cm)			RMS (cm)		
	转换前	转换后	变化量	转换前	转换后	变化量
EMR vs IGS	1.959	1.400	0.559	0.064	0.042	0.022
ESA vs IGS	2.493	2.174	0.319	0.079	0.066	0.013
JPL vs IGS	1.735	1.054	0.681	0.057	0.031	0.026

由上表可知，将 2013 年 09 月 29 日至 10 月 12 日这 14 天数据求得的转换参数，应用于 2013 年 10 月 13 日至 10 月 26 日这 14 天的轨道数据，进行坐标转换，转换后分析中心与 IGS 最终轨道残差平均值和 RMS 均变小，其中平均值减小 30mm~70mm，RMS 减小 10mm~30mm。由于 IGS 发布最终星历具有一定的延迟性，用户若想通过分析中心轨道产品，提前得到与 IGS 最终产品一致性更高的轨道数据，可使用此方法。

另外可以看出，相较于 EMR 和 ESA，JPL 与 IGS 之间的轨道产品一致性更好，由于 IGS 发布最终星历的延迟性，在 IGS 发布最终星历之前，用户自行综合时应给予 JPL 的轨道数据更大的权重。

3.3 小结

通过原始数据做差，结果反映了分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品之间的差异，并对差异产生的原因进行了分析，同时，发现两者之间的钟差和轨道产品均存在周期性差异。通过七参数坐标转换，去除分析中心与 IGS 最终轨道间系统误差的方法，能使一定程度减小两者残差平均值和 RMS，其中平均值减小 60mm~70mm，RMS 减小 1mm~2mm。将 2013 年 09 月 29 日至 10 月 12 日这 14 天数据求得的转换参数，应用于 2013 年 10 月 13 日至 10 月 26 日这 14 天的轨道数据，进行坐标转换，转换后分析中心与 IGS 最终轨道残差平均值和 RMS 均变小，其中平均值减小 30mm~70mm，RMS 减小 10mm~30mm。

相较于 EMR 和 ESA，JPL 与 IGS 之间的轨道产品一致性更好。由于 IGS 发布最终星历具有一定的延迟性，在 IGS 发布最终星历之前，用户自行综合时应给予 JPL 的轨道数据更大的权重。

第 4 章 频谱分析

本章针对分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品之间的周期性差异, 采用频谱分析的方式寻找周期项。频谱分析前, 需按照第 3 章中数据处理方法, 对数据进行预处理, 钟差数据做一次差, 轨道数据做两次差, 消除分析中心精密钟差和轨道数据与 IGS 最终产品的系统性误差。

频谱分析是指将时域信号变换至频域加以分析的方法。频谱分析的目的是把复杂的时间历程波形, 经过傅里叶变换分解为若干单一的谐波分量来研究, 以获得信号的频率结构以及各谐波和相位信息。测试信号的频域分析是把信号的幅值、相位或能量变换以频率坐标轴表示, 进而分析其频率特性的一种分析方法, 又称为频谱分析。对信号进行频谱分析可以获得更多有用信息, 如求得动态信号中的各个频率成分和频率分布范围, 求出各个频率成分的幅值分布和能量分布, 从而得到主要幅度和能量分布的频率值^[39]。

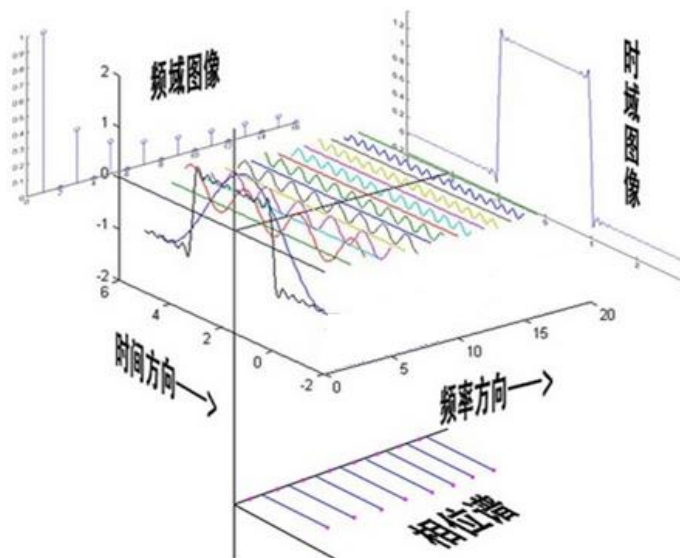


图 4-1 时域与频域

4.1 傅里叶变换

4.1.1 傅里叶变换的定义

傅立叶变换, 能将满足一定条件的某个函数表示成三角函数 (正弦和/或余弦函数) 或者它们的积分的线性组合^[40]。在不同的研究领域, 傅立叶变换具有多种不同的变体形式, 如连续傅立叶变换和离散傅立叶变换。

傅里叶级数的三角函数展开式^[41]:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (4-1)$$

傅里叶系数:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) dt \quad (4-2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (4-3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (4-4)$$

其中, T 为周期, ω_0 为基频, $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ 。

将 $f(x)$ 的傅里叶变换定义为 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-i2\pi xs} ds$

这个积分是关于 s 的积分函数, 可以记为 $F(s)$ 变换, 因此我们有

$$\int_{-\infty}^{+\infty} F(s)e^{-i2\pi os} ds \quad (4-5)$$

当 $f(x)$ 是 x 的偶函数时, 即当 $f(x) = f(-x)$ 时, 重复变换就可以得到 $f(\omega)$, 这就和开始的函数相同也就是傅里叶变换的循环特性, 并且因为这个循环是由两步循环而完成的, 这就意味着具有以下的互易特性: 如果 $F(s)$ 是 $f(x)$ 的傅里叶变换, 那么 $f(x)$ 也就是 $F(s)$ 的傅里叶变换。

然而, 循环和互易特性其实并不完美, 因为当 $f(x)$ 是奇函数时, 即有 $f(x) = -f(-x)$ 时, 由重复变换就会得到 $f(-\omega)$, 不过一般来说, 不论 $f(x)$ 是奇函数、偶函数甚至两者都不是时, 用重复变换仍然可以得到。

其可逆性傅里叶变换的常用公式为:

$$F(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-i2\pi xs} dx \quad (4-6)$$

通过使用这种形式两个连续的变换便可以得到其原函。但是, 第二个变换和第一个变换并不是完全一致的, 所以面对这两种傅里叶变换从而加以区分是很有必要的。因此我们将把 $f(x)$ 称为 $F(s)$ 的 $+i$ 变换, $F(s)$ 称为 $f(x)$ 的 $-i$ 变换。

于是, 我们再次将函数 $f(t)$ 的傅里叶变换 $F(\omega)$ 设为如下的概念:

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (4-7)$$

如果用算子符号表示出来那么当今 F 为傅里叶变换算子时, 则上式可以表

示为:

$$F(\omega) = Ff(t) \quad (4-8)$$

易得出:

$$\begin{cases} F^2 f(t) = f(-t) \\ F^4 f(t) \approx f(-t) \end{cases} \quad (4-9)$$

4.1.2 傅里叶变换的作用

傅里叶的最大贡献就在于他将前人的一些思想巧妙地综合并形成自己的一种思想,它抛弃了许多繁杂的数学证明过程,直接使用正弦谐波函数的无穷和来表示任何一个函数。确实,在工程应用与科学研究的许多问题中起着及其重要的作用的就是正弦信号(或者是傅里叶级数与傅里叶变换)。如在交流电产生的电流、电压,气候的周期性以及行星运动的周期等都会很自然地用到正弦信号;海浪也可以被认为是根据不同波长的线性组合形成的正弦函数;电视台与无线电台发射的信号也基本属于正弦函数;甚至连现在最新的短时 FFT、小波变换等领域最初也以傅里叶变换作为基础知识来探究的。下面我们分别从两个方面来重点介绍傅里叶变化所做出的伟大而不可取代的重要贡献^[42]:

(1) 数学方面

在数学方面,它主要的贡献在于对研究热的传播时所创立的一整套数学理论知识。在 1807 年时,当傅里叶向巴黎科学院呈交了一篇名为《热的传播》的论文时,著名的热传导方程就在其中被推导出来,并且在求解该方程的过程中他还发现解函数也是可以根据三角函数所构成的无穷级数来进行表示,进而提出对于任何一个函数均可以用展成三角函数的无穷级数形式表示出来。由此傅里叶级数即三角级数、傅里叶分析等理论都是由他创造出来的。他的其余贡献还体现在:对于人们最早使用的定积分符合,后来经过改进了代数方程的符号法则的证明方法与实数根的个数的判别法等计算领域都有涉及。

现在我们从现代数学的眼光可以看出,傅里叶变换其实就是一种特殊的积分变换之一。它除了可以满足在一定条件下的某些函数能够表示成的正弦基函数中的线性积分或者是组合问题。然而对于不同的研究领域,傅里叶变换也同样具有着不同的形式和变换;例如,对于离散傅里叶变换与连续傅里叶变换就是具有不同形式的。

然而傅里叶变换也是属于调和分析的一个范畴,它其中的“分析”,也有条分缕析的意思。它主要是通过利用对其函数的条分缕析对那些复杂函数进行深入的理解从而认真将其研究。以哲学观点来看,它其实也是分析主义和还原主义之间的关系,其本质也就是通过对事物内部之间进行适当的分析从而达到增进对其本质的理解这样一个目的例如,对于近代原子论,它主要的思想是通过将世界上的所有物质本源都分析为原子,然而事实上原子仅仅只有数百种而已,那么当面对着物质世界中有着无限丰富的内容时,这种分类与分析将会作为认识事物的各种性质时所提供的非常好的一个手段进行讨论。

不过对于数学领域也是一样,虽然最初傅里叶分析是以作为热过程的解析分析作为一种工具,但是它的很多思想方法依然具有典型的分析主义与还原论等特征。其实对于任意的一个函数,当通过一定的分解后,均能表示为正弦函

数的线性组合形式，然而正弦函数在物理上也是被充分研究的对象，只是相对于数学来说稍微简单的一种函数类，因此这类想法跟化学上的原子论的想法有极其相似之处。只是奇妙的是，在现代数学中可以发现傅里叶变换具有很好的理论知识，从而使得它在很多时候都很有用处，同时也很好用。这就让人不得不感叹世界造物的神奇之处了。下面从几个方面介绍傅里叶变换在数学中的体现与应用：

由于傅里叶变换是一个线性算子，如果对其赋予适当范数的时候，它仍然是酉算子不会变成其他算子；对于傅里叶变换的逆变换是比较容易计算出来的，并且计算出来的形式与正变换形式是极其相似的；根据正弦基函数作为微分运算的一个本征函数，从而使得对于线性微分方程的求解过程就可以转化为对于常系数代数方程中的傅里叶进行求解。然而对于处理线性时不变的物理系统问题时，频率就作为一个不变的性质，因此当系统对于较复杂的响应时可以采用组合其对不同频率的正弦信号的响应从而获取信息；通过著名的卷积定义指出：傅里叶变换可以将复杂的卷积运算化成极其简单的乘积运算，这就提供了一种计算卷积的简单而有效的方法；对于离散形式的傅里叶变换，也可以利用数字计算机来进行快速计算(此种算法称为快速傅里叶算法简称 FFT)。正是由于有了上述一些傅里叶变换的良好性质，因此傅里叶变换在密码学、光学、声学、物理学、信号处理、组合数学、概率、数论、统计等很多领域都有着广泛的应用并取得了很大的进步。

(2) 物理方面

在物理学方面他同时作为傅里叶定律的创始人，在 1822 年，他的代表作品《热分析理论》，这篇文章解决了热在非均匀加热的固体中进行分布传播等系列问题，因此他将分析学在物理学中的应用成为最早的例证之一，并且对 19 世纪的理论物理学发展也同样产生了深远的影响同时也取得极其重要的作用。根据傅里叶定律在传热中可以作为一个基本定律来进行讨论，因此它可以用来解决关于计算热量的传导量的一些基本问题。

在数字信号处理中傅里叶变换对这一领域中的算法也起到了很重要的作用。因此要理解傅里叶变换中算法的意义所在，需要先了解傅立叶变换中原理的意义所在才行。通过傅里叶原理表明：对于任何一个测量连续的信号或时序来说，均可以表示为在正弦波信号中对不同频率的无限叠加这一方式。不过根据这一原理所创立的傅里叶变换的算法科研利用直接测量到的原始信号进行分析，并以累加方式来计算该部分信号中不同正弦波信号的频率、振幅、相位及能量等问题。然而与傅里叶变换算法相对应的算法就是反傅里叶变换。这种反变换算法从本质上来说其实也就是一种累加处理算法，这样的目的就在于将单独改变的正弦波信号转换成一个整体信号从而便于观察。由此可以看出：傅里叶变换就可以将原来很难处理的时域信号转换成了现在易于分析的频域信号(对于信号的频谱变换也就是将这些频域信号转换成一种时域信号)。

由此可以看出，傅里叶变换揭示了频谱函数与时间函数之间的内在联系和区别，对于传统的平稳信号的分析与处理中有着非常重要的地位和作用。所以在许多理论或应用的研究中，都会将傅里叶变换作为最基本的一种经典工具来进行使用与分析。因此，不管是数学方面，还是物理方面的领域，傅里叶都取得了很大成功，并且也做出了巨大贡献。这使得其在科学论坛中占据着重要的作用和地位，如果没有傅里叶这位著名的数学家兼物理学家，或许也没有今天科学的成就。但是不得不承认任何事物都会有其漏洞或局限性，加上由于当时

的科学不够完善，傅里叶变换也存在一些缺点和局限性。

4.2 快速傅里叶频谱分析

4.2.1 基本原理

在傅里叶变换中一般都是把待分析信号分解为复指数信号，使用复指数信号来表示离散时间信号的目的和连续时间是一样的，因为复指数信号是 LTI 系统的特征函数。这些函数通过 LTI 系统以后只是在幅值上有一个变化，函数的形式还是和原来一样。所以使用复指数信号来表针函数是很有意义的。对于周期信号，我们使用离散时间傅里叶级数，对于非周期信号，我们使用的工具是离散时间傅里叶变换。在分析离散时间信号的时候，我们的分析方法和连续非周期信号类似，傅里叶系数可以表示为傅里叶包络的采样。这个包络是周期信号一个周期的信号的傅里叶变换。离散傅里叶变换和连续傅里叶变换不一样的就是没有了对偶性，离散傅里叶变换总是 2π 为周期的，而连续的包含无穷多的频率分量。为了使用傅里叶级数来表针离散周期信号，我们仍然使用谐波相关的复指数信号来表示。之前讨论的连续时间复指数函数和离散时间复指数函数的一个重大区别就是离散时间复指数函数是以 2π 为周期重复的，所以随着频率的变换，我们可以发现离散时间复指数不断的重复。离散时间傅里叶变换的公式如下所示^[43]：

$$\left(\begin{array}{l} X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn} \quad (k = 0, 1 \dots N-1) \\ W_N^{kn} = e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \end{array} \right) \quad (4-10)$$

式中， N 为采样点个数， $x(n)$ 表示离散数字信号序列， W_N 为旋转因子， $X(k)$ 为序列对应的 N 个离散频率点的相对振幅。

在使用计算机来实现上实现上序列的话，对于一个 N 长度的 $x(n)$ ，需要进行 N 次的复数乘法和 $N-1$ 次的加法，算法的复杂程度正比与 N 的平方，如果 N 取 1024 点，其运算程度是不可接受的。所以离散傅里叶变换很长时间以来都是一个理论上的东西，实际运用中很少，直到快速傅里叶变换（FFT）算法的出现。

在很多情况下，要求 FFT 的点数取的是 2 的 N 次方个点，因为这样子可以方便 FFT 的计算（Hoyer E A et al., 1977；童庆为，2010）。对于 N 点的运算，其最终的输出也是 N 点的。基二的 FFT 算法的思想就是把输出信号一直分割直到两个两个一组为止。

在推导 FFT 的过程中需要用到 W_N^m 具有的三个比较重要的性质：

$$(1) \text{ 周期性 } W_N^{IN+m} = W_N^m$$

$$(2) \text{ 对称性 } W_N^{\frac{N}{2}+m} = -W_N^m$$

$$(3) \text{ 变换性质 } W_N^m = W_{\frac{N}{2}}^{\frac{m}{2}}$$

在分析 DFT 的时候，首先是把 DFT 拆分成为奇数一组，偶数一组：

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn} = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2r)W_N^{k2r} + \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2r+1)W_N^{k(2r+1)} \quad (4-11)$$

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn} = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2r)W_N^{kr} + \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2r+1)W_N^{kr}W_N^k \quad (4-12)$$

我们使用新的序列 $x1(n)$ 来表示偶序列， $x2(n)$ 来表示奇序列，则：

$$x(k) = x1(k) + W_N^k x2(k) \quad (4-13)$$

其中， $x1(k)$ 和 $x2(k)$ 均是以 $\frac{N}{2}$ 为周期， $W_N^{k+\frac{N}{2}} = -W_N^k$ ，一个具体的例子，

假如是一个 8 点的 DFT：

$$\begin{cases} x(0) = x1(0) + W_8^0 x2(0) \\ x(1) = x1(1) + W_8^1 x2(1) \\ x(2) = x1(2) + W_8^2 x2(2) \\ x(3) = x1(3) + W_8^3 x2(3) \end{cases} \quad (4-14)$$

当第 4 个点的时候，由于 $x1$ 的周期是 4，所以 $x1(4) = x1(0)$ ， $x2(4) = x2(0)$ ，

$W_8^4 = -W_8^0$ ，于是：

$$\begin{cases} x(4) = x1(0) - W_8^0 x2(0) \\ x(5) = x1(1) - W_8^1 x2(1) \\ x(6) = x1(2) - W_8^2 x2(2) \\ x(7) = x1(3) - W_8^3 x2(3) \end{cases} \quad (4-15)$$

上述过程把 N 点的 DFT 运算分解为了两个 $\frac{N}{2}$ 点的运算，这样使得运算量大幅度减小。

假如采样频率是 f ，采样点数为 N ，则 FFT 的分辨率为 $\frac{f}{N}$ 。分辨率代表

着每个频率点所能表示的最小值。第 N 点的频率值是 $\frac{f(N-1)}{N}$ 。输出的信号包

括了输入信号的实部和虚部信息。其模值是根号下实部和虚部的平方和。其频率上的幅值大小等于模除以 (N 对于直流, $N/2$ 对于其他谐波), 相位信息则是虚部除以实部的反正切值。

4.2.2 分析结果

以 PRN05、PRN10 为例, GPS 周为 1760 的精密钟差频谱分析结果如下图:

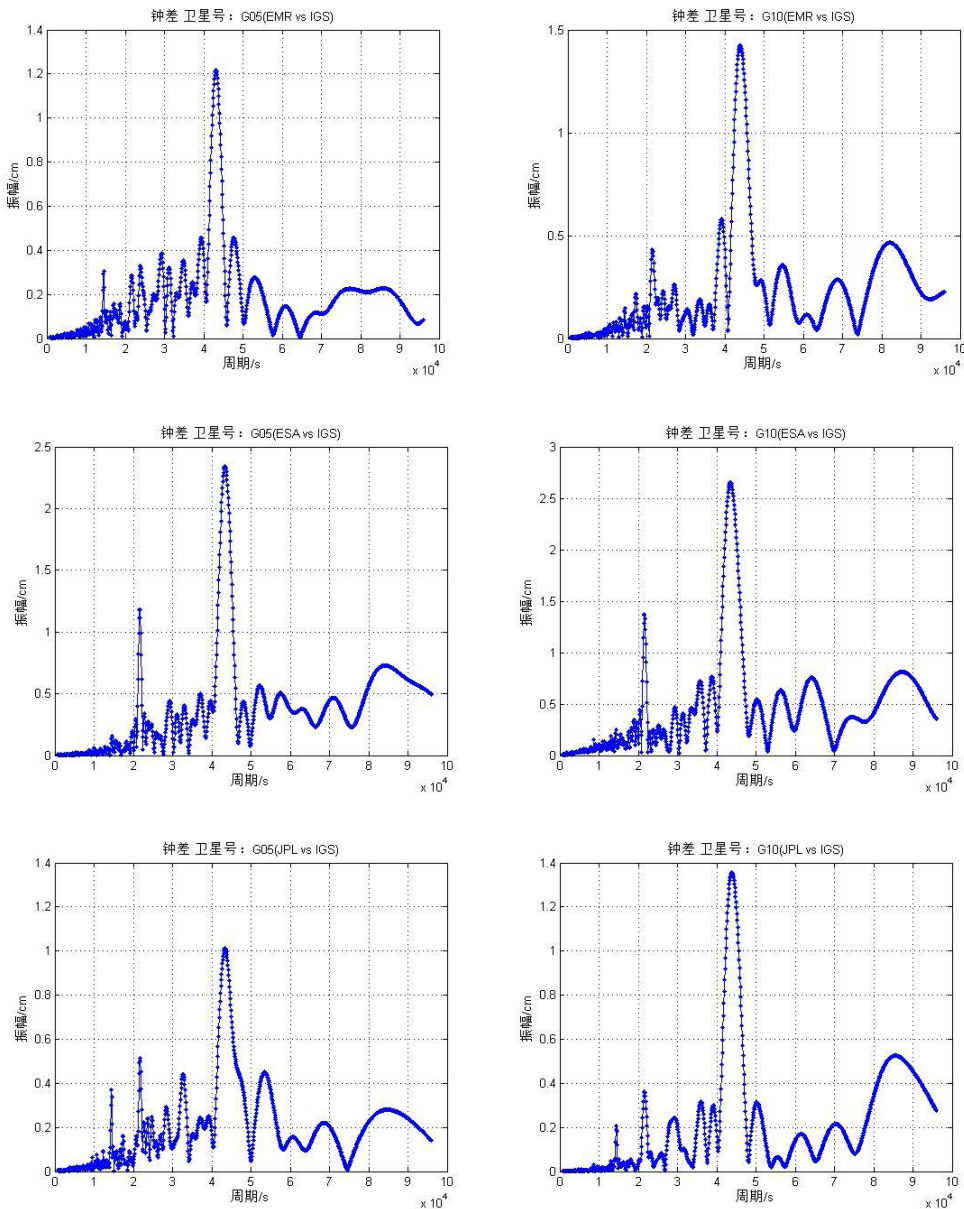


图 4-2 精密钟差频谱分析结果

精密轨道频谱分析结果如下图:

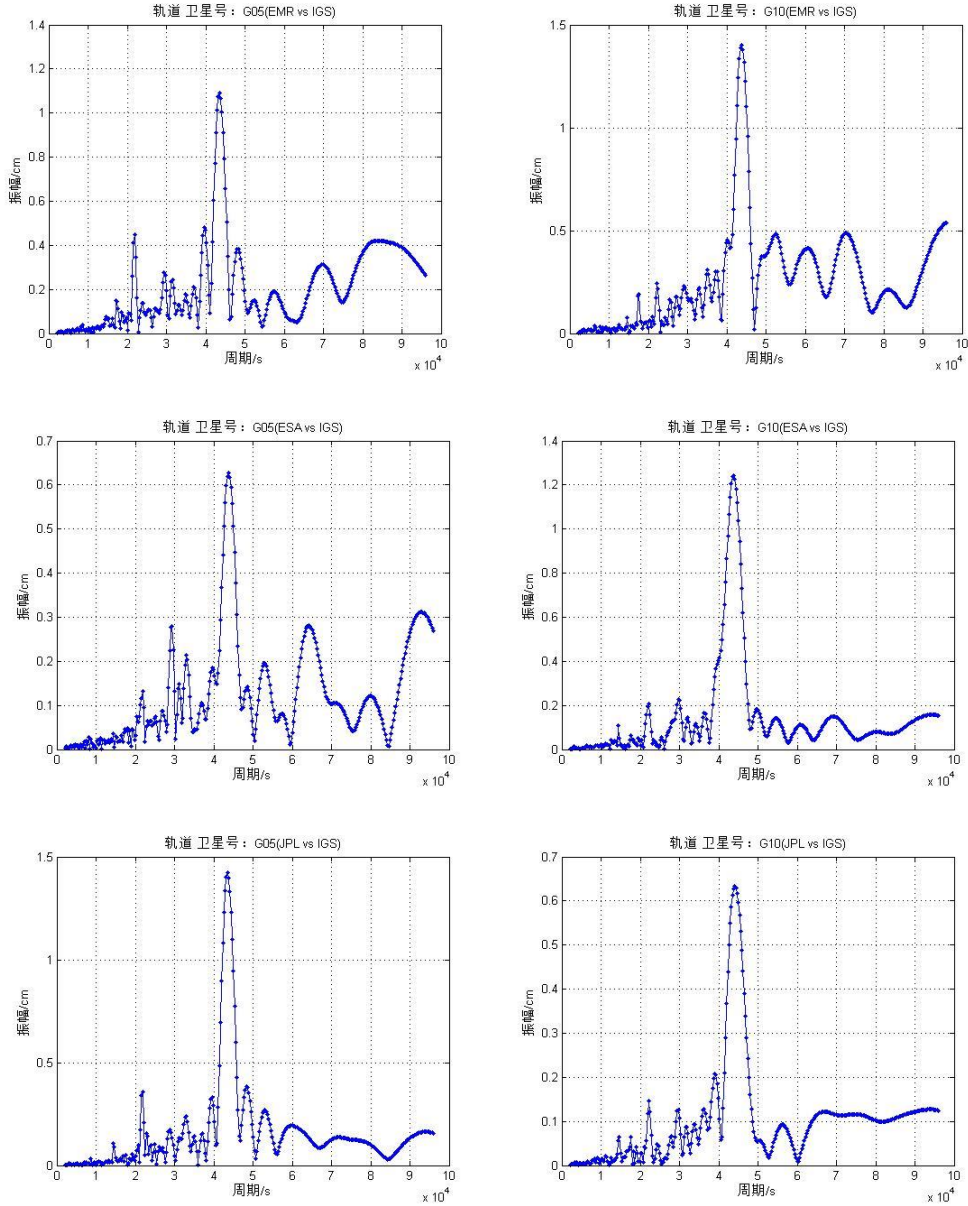


图 4-3 精密轨道频谱分析结果

可以看出，精密钟差和精密轨道数据的快速傅里叶变换频谱图中，均在 43200s 附近出现峰值，说明对于 PRN05、PRN10 卫星，43200s 这一周期为主要周期。为验证这一结论的普遍性，对所有卫星的分析结果，记录对应峰值的周期，同一卫星 1760 至 1769 周的结果求均值和标准差，钟差周期统计结果如表 4-1 所示，轨道周期统计结果如表 4-2 所示。

表 4-1 钟差周期统计

PRN \ ACs	EMR vs IGS		ESA vs IGS		JPL vs IGS	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
02	43271	879	43159	872	43596	1023
03	42541	498	43135	829	43593	1101
04	43253	864	43064	504	42968	479
05	43227	486	43173	278	42962	187
06	42785	555	43540	760	42891	884

07	43243	301	43344	413	43109	225
08	42770	863	42844	256	42873	463
09	42617	482	43239	645	43078	424
10	43212	1348	43172	1054	42897	715
11	43558	673	43166	500	43314	739
12	42908	263	43201	362	43118	229
13	43115	312	42998	560	43128	292
14	43228	626	43027	210	43264	618
15	42947	510	43316	255	42831	252
16	42647	414	43220	822	42910	308
17	43236	358	43316	236	43132	210
18	42872	459	43142	206	43058	236
19	42708	406	42860	1060	42986	326
20	42796	588	43357	557	42836	366
21	43188	1018	43108	259	43659	837
22	43217	756	42808	245	43206	530
23	43164	235	43364	843	43070	327
24	43114	582	43185	250	43298	630
25	43482	613	42929	365	43116	436
26	43347	780	43128	307	42819	500
27	42822	988	43553	812	43270	743
28	43420	216	42641	434	43163	266
29	43072	904	43177	359	43129	741
31	43183	278	43005	196	42947	476
32	43274	1222	43334	893	42705	694

表 4-2 轨道周期统计

PRN \ ACs	EMR vs IGS		ESA vs IGS		JPL vs IGS	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
01	43815	504	43034	216	43564	294
02	42938	512	43366	182	43070	540
03	43041	530	43122	77	43242	274
04	43310	175	43305	320	43247	155
05	43086	241	43337	652	43042	117
06	43297	784	43104	88	43161	288
07	43166	117	43241	104	43129	99
08	43223	279	43098	110	43156	345
09	43191	189	43122	97	43191	145
10	43317	277	43049	186	43221	261
11	43390	761	43098	125	43588	605
12	43166	125	43113	672	43122	65
13	43147	84	43247	185	43129	68
14	43186	251	42999	136	43203	132
15	43173	206	43242	253	43098	60

16	43110	108	42939	307	43110	101
17	43144	404	43285	175	43030	88
18	43068	157	43001	357	43102	122
19	43304	184	43147	79	43279	197
20	43160	60	43146	514	43098	160
21	43348	585	43173	183	43311	317
22	42995	322	43098	166	43141	144
23	43154	114	43161	250	43172	57
24	42971	686	43043	218	43130	761
25	43103	497	43401	724	43207	663
26	43094	341	43098	60	42938	333
27	43265	766	43017	83	43187	534
28	43224	307	43094	356	43067	147
29	43313	272	42973	172	43185	110
31	43142	176	42986	104	43292	231
32	42762	396	42551	225	42558	266

为更加直观，通过表 4-1 和表 4-2 中的统计数据，以卫星号为横坐标，周期均值为纵坐标，可得精密钟差主周期图和精密轨道主周期图，分别如图 4-4 和图 4-5 所示。

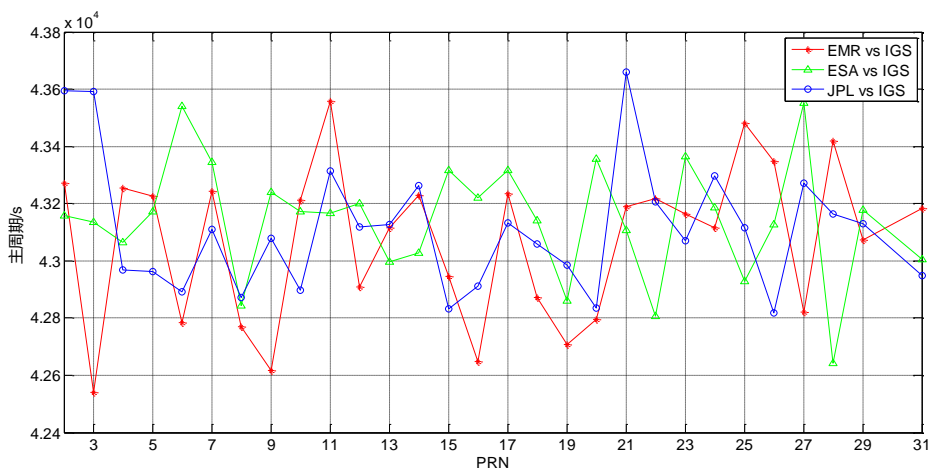


图 4-4 精密钟差主周期

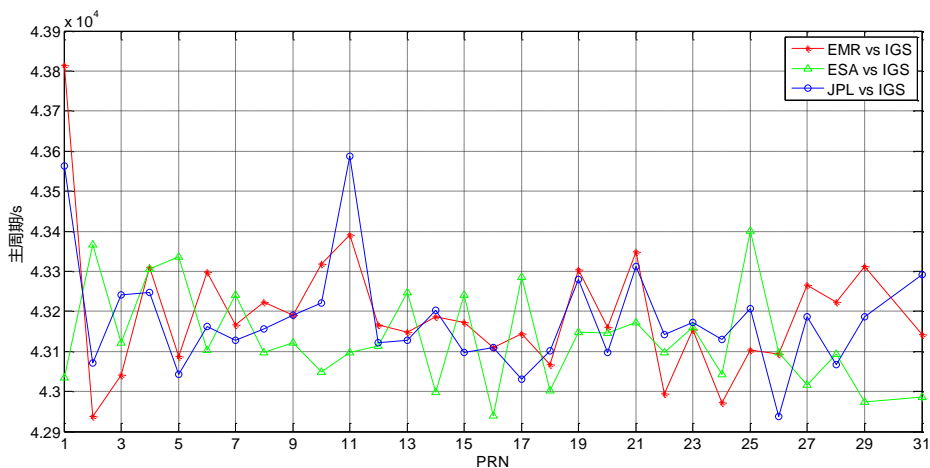


图 4-5 精密轨道主周期

从图 4-4 和图 4-5 可以看出,快速傅里叶变换频谱分析结果中,分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品偏差中均存在 43200s 左右的周期性偏差,考虑到 GPS 的运行周期为 12h 即 43200s,故这一周期性偏差的存在可能与 GPS 运行周期之间存在较大的相关性^[44]。

4.3 最小二乘频谱分析

4.3.1 基本原理

最小二乘频谱分析(LSSA)与快速傅里叶变换频谱分析相比,需要更长的计算时间,且结果频率可能互相相关,但突出优点是它不受数据采样间隔的影响,对于不等间距或出现数据断链的序列不需要通过插值进行处理便可直接进行最小二乘频谱分析^[45]。

由傅里叶分析的基本原理,一个连续信号可以表示为一系列正弦信号的叠加^[46],一个平稳连续信号 $Y(t)$ 可以表示为:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^k A_i \cdot \sin(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (4-19)$$

其中: A_i 为第 i 个周期项对应的频率成分的幅值; f_i 为第 i 个周期项对应的频率; θ_i 为相位; k 为组成该信号的频率成分数目,理论上为无穷个。最小二乘频谱分析的思想为: 求出(4)式中所有 k 个频率成分的振幅 $\{A_i\} (i=1,2,\dots,k)$, 若某一频率成分 f 的振幅 A 明显大于其他频率成分的振幅,即可证明该频率所对应周期项的系数 A 对(4)式的影响远远大于其他频率所对应的周期项,即该频率 f 为主频率,对应的周期即为主要周期^[47]。为了求出(4)式中所有频率成分的振幅,假设信号 $Y(t)$ 中只包含第 j 个周期项,将第 j 个周期项展开得到:

$$Y(t) = A_j \sin(2\pi f_j t + \theta_j) = a_j \cdot \sin(2\pi f_j t) + b_j \cdot \cos(2\pi f_j t) \quad (4-20)$$

其中:

$$A_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2} \quad (4-21)$$

若已知一个有 n 个数据的序列 $\{Y(t)\}$, 其中 $t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 则(5)式可写为:

$$\begin{bmatrix} Y(t_1) \\ Y(t_2) \\ Y(t_3) \\ \vdots \\ \vdots \\ Y(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(2\pi f_j t_1) & \cos(2\pi f_j t_1) \\ \sin(2\pi f_j t_2) & \cos(2\pi f_j t_2) \\ \sin(2\pi f_j t_3) & \cos(2\pi f_j t_3) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \sin(2\pi f_j t_n) & \cos(2\pi f_j t_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

(7) 式可写为: $\mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{X}$, 其中:

$$\mathbf{X} = [a_j \quad b_j]^T \quad (4-23)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sin(2\pi f_j t_1) & \cos(2\pi f_j t_1) \\ \sin(2\pi f_j t_2) & \cos(2\pi f_j t_2) \\ \sin(2\pi f_j t_3) & \cos(2\pi f_j t_3) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \sin(2\pi f_j t_n) & \cos(2\pi f_j t_n) \end{bmatrix} \quad (4-24)$$

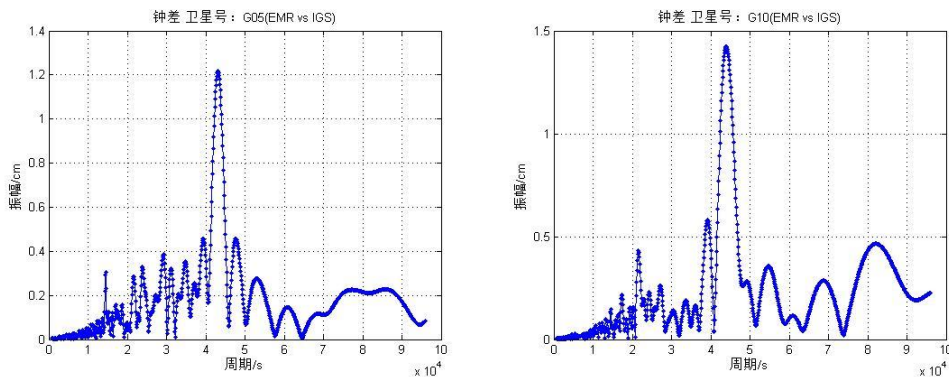
故 \mathbf{X} 的最小二乘解为:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y} \quad (4-25)$$

求出 \mathbf{X} 后利用 (6) 式即可求出第 j 个周期项的振幅 P_j , 由这种方法求出的振幅 P_j 应该为实际振幅的 k 倍, 即 $A_j = P_j / k$ 。求出所有频率成分的振幅后即可通过比较振幅大小判断出原时间序列的主频率及其对应主要周期^[48]。

4.3.2 分析结果

以 PRN05、PRN10 为例, GPS 周为 1760 的精密钟差频谱分析结果如下图:



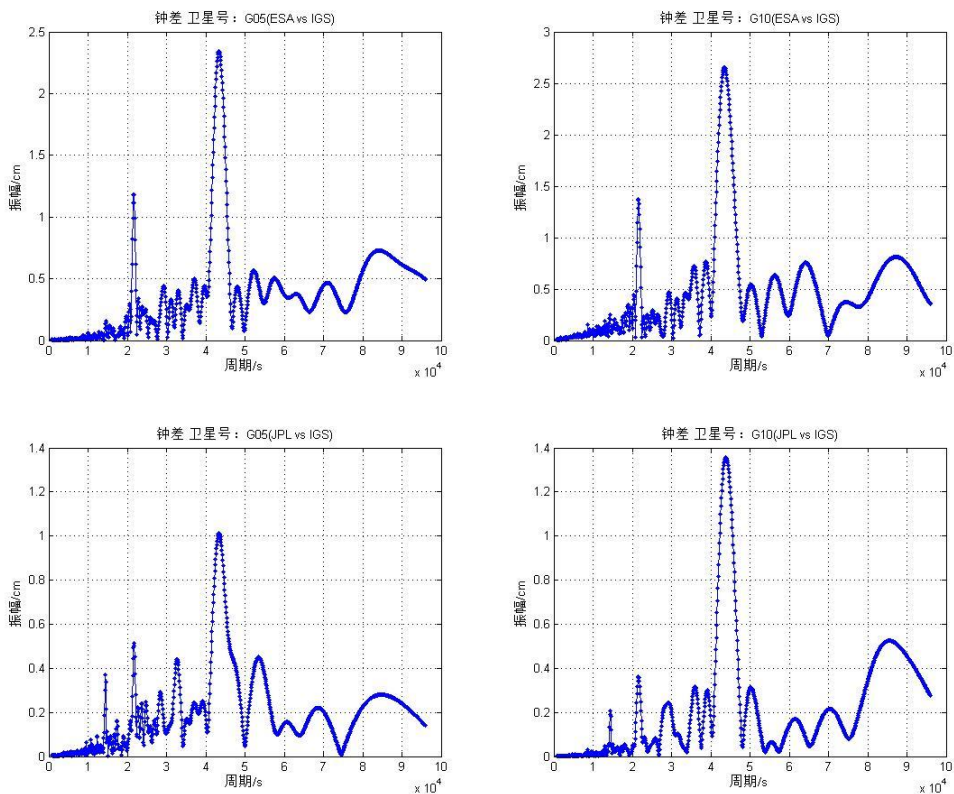
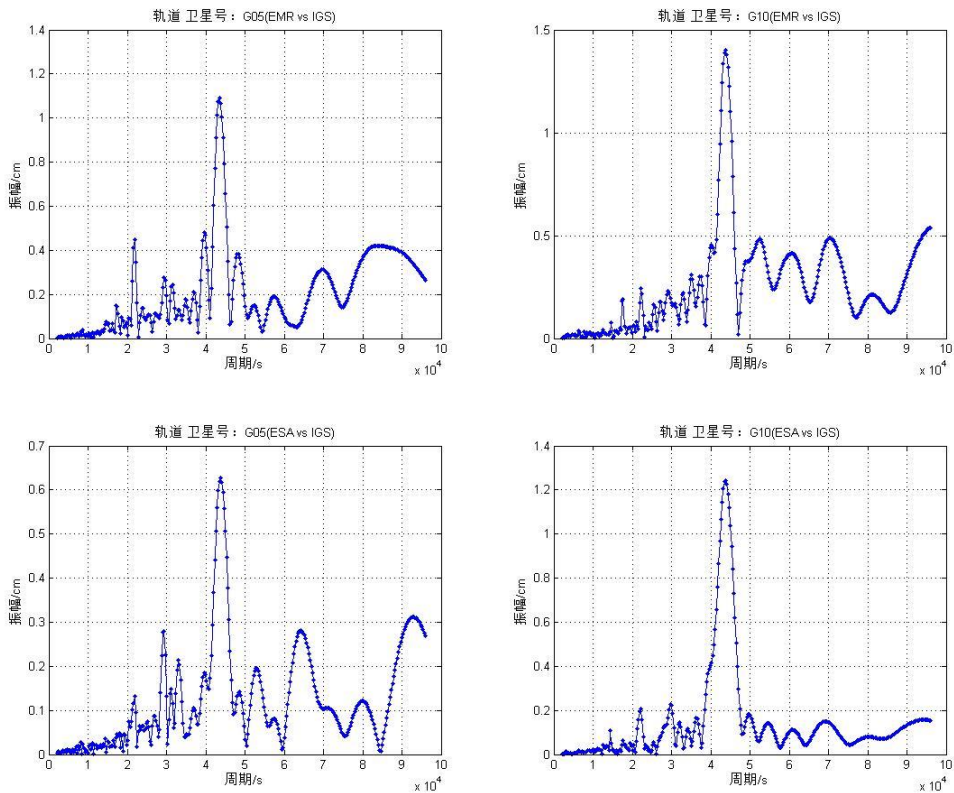


图 4-6 精密钟差频谱分析结果

精密轨道频谱分析结果如下图:



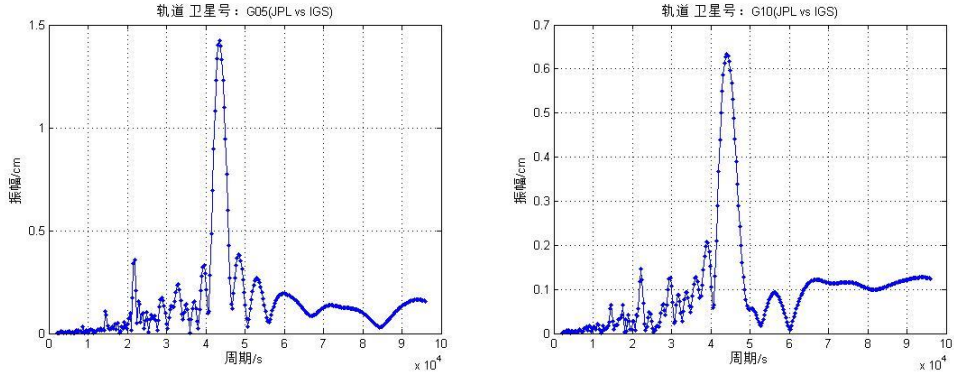


图 4-7 精密轨道频谱分析结果

可以看出，精密钟差和精密轨道数据的最小二乘频谱图中，均在 43200s 附近出现峰值，说明对于 PRN05、PRN10 卫星，43200s 这一周期为主要周期。为验证这一结论的普遍性，对所有卫星的分析结果，记录对应峰值的周期，同一卫星 1760 至 1769 周的结果求均值和标准差，钟差周期统计结果如表 4-3 所示，轨道周期统计结果如表 4-4 所示。

表 4-3 钟差周期统计

PRN	ACs	EMR vs IGS		ESA vs IGS		JPL vs IGS	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
02		43312	573	43748	818	43446	468
03		43169	478	43331	717	43250	976
04		43720	877	43428	272	43237	302
05		43357	328	43303	162	43278	184
06		43093	329	43238	791	43448	736
07		43421	238	43363	282	43301	173
08		43110	409	43244	165	43218	283
09		43203	241	43468	522	43236	199
10		43545	762	43290	202	43450	515
11		43652	472	43421	513	43428	364
12		43231	163	43316	320	43341	137
13		43366	249	43216	451	43328	192
14		43297	299	43206	182	43328	563
15		43218	325	43393	192	43439	540
16		43258	183	43673	1014	43266	140
17		43308	345	43374	129	43337	166
18		43142	352	43322	197	43229	301
19		43272	274	43166	636	43328	160
20		43266	249	43207	500	43218	222
21		43051	828	43381	285	43419	719
22		43287	252	43233	307	43208	339
23		43306	141	43178	701	43317	183
24		43314	472	43313	146	43457	294
25		43508	540	43136	426	43346	510

26	43301	608	43323	96	43289	378
27	43208	721	43168	652	43458	240
28	43511	377	43242	241	43305	206
29	42993	564	43230	170	43426	737
31	43265	219	43190	223	43197	301
32	43236	593	42976	629	43166	869

表 4-4 轨道周期统计

PRN	ACs	EMR vs IGS		ESA vs IGS		JPL vs IGS	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
01		44209	520	43400	258	43974	333
02		43353	514	43776	249	43460	619
03		43485	541	43462	120	43613	258
04		43715	275	43721	331	43651	289
05		43511	326	43772	433	43426	159
06		43695	678	43481	190	43548	345
07		43521	238	43631	260	43457	196
08		43635	390	43477	202	43608	386
09		43600	258	43542	232	43636	178
10		43709	248	43515	180	43621	209
11		43721	818	43451	210	43929	661
12		43488	146	43430	699	43464	114
13		43532	166	43620	253	43461	123
14		43611	295	43396	172	43556	129
15		43582	262	43601	354	43464	114
16		43501	139	43335	364	43489	35
17		43550	620	43782	152	43467	104
18		43465	229	43349	431	43484	182
19		43704	261	43496	151	43639	264
20		43524	184	43574	453	43517	298
21		43747	537	43568	255	43695	425
22		43383	321	43478	244	43529	223
23		43529	172	43556	315	43521	191
24		43314	760	43451	386	43437	761
25		43446	556	43694	585	43540	613
26		43521	377	43459	130	43363	306
27		43622	651	43384	200	43598	647
28		43664	336	43536	406	43463	232
29		43720	361	43387	239	43534	162
31		43598	263	43380	210	43679	154
32		43505	563	43358	288	43359	321

为更加直观，通过表 4-3 和表 4-4 中的统计数据，以卫星号为横坐标，周期均值为纵坐标，可得精密钟差主周期图和精密轨道主周期图，分别如图 4-8 和图 4-9 所示。

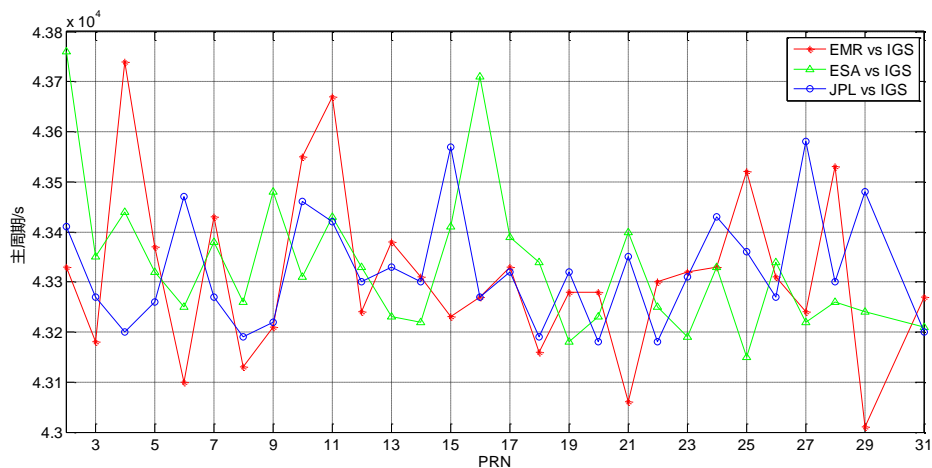


图 4-8 精密钟差主周期

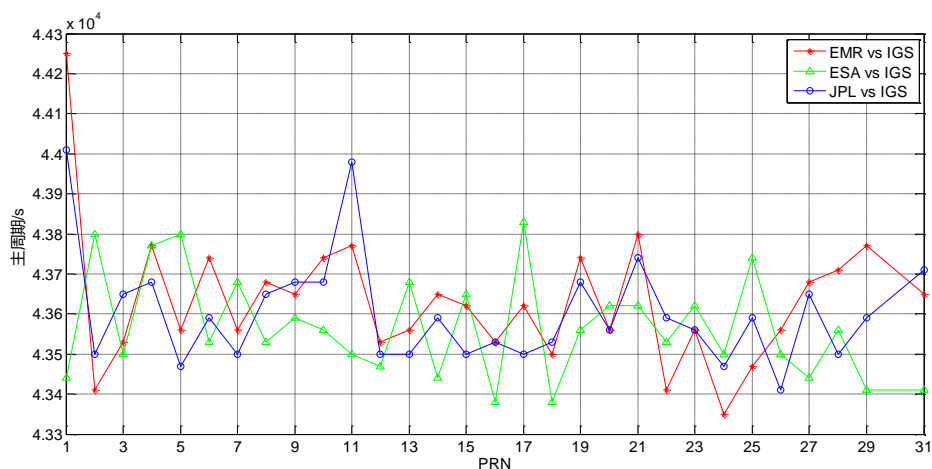


图 4-9 精密轨道主周期

从图 4-8 和图 4-9 可以看出，最小二乘频谱分析结果中，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品偏差中均存在 43200s 左右的周期性偏差。这一结果与快速傅里叶变换频谱分析结果相同，证明了结果的真实性以及这一周期的存在性。

4.4 去周期

通过快速傅里叶变换频谱分析以及最小二乘频谱分析，均得到分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品间，存在 43200s 左右的周期性偏差，本节针对这一周期性偏差，进行去周期，并比较去周期前后数据的一致性。

4.4.1 去周期过程

将周期项去除在分析中心的精密钟差和轨道数据上，去除周期后，按相同的方式与 IGS 最终产品作差，从而比较去除周期前后，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品差值的变化情况。

设在历元 t ，分析中心精密钟差和轨道产品的值为 L ，若频谱分析得到的主

周期对应的主频率为 f ，以及对应参数 a 、 b ，则在可按下式计算的去周期后的值 L' ：

$$L' = L - a \cdot \sin(2\pi ft) + b \cdot \cos(2\pi ft) \quad (4-16)$$

4.4.2 去周期前后对比

(1) 差值变化

仍以 PRN05、PRN10 为例，钟差去周期前后分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品的差值对比如下图：

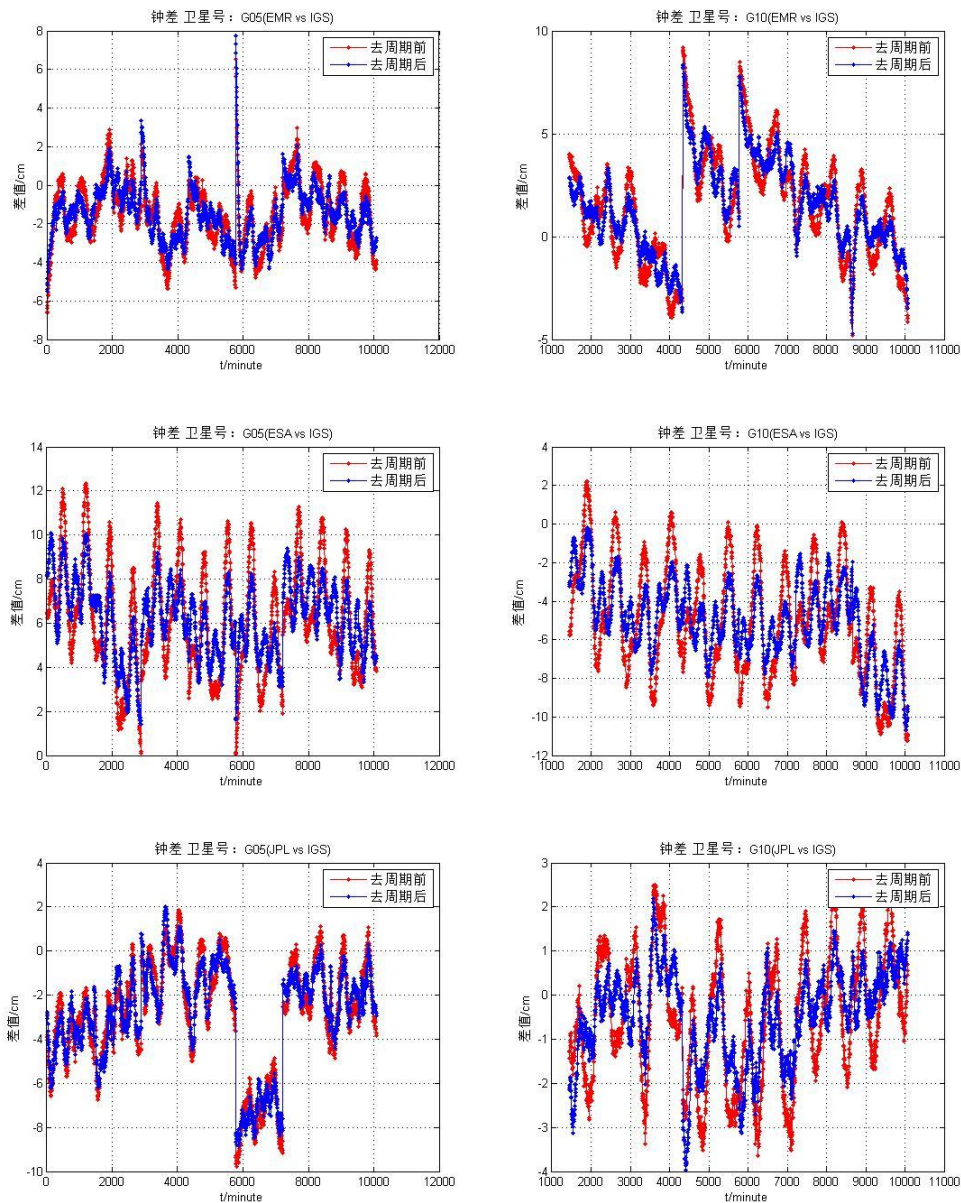


图 4-10 精密钟差去周期前后差值对比
轨道去周期前后差值对比如下图：

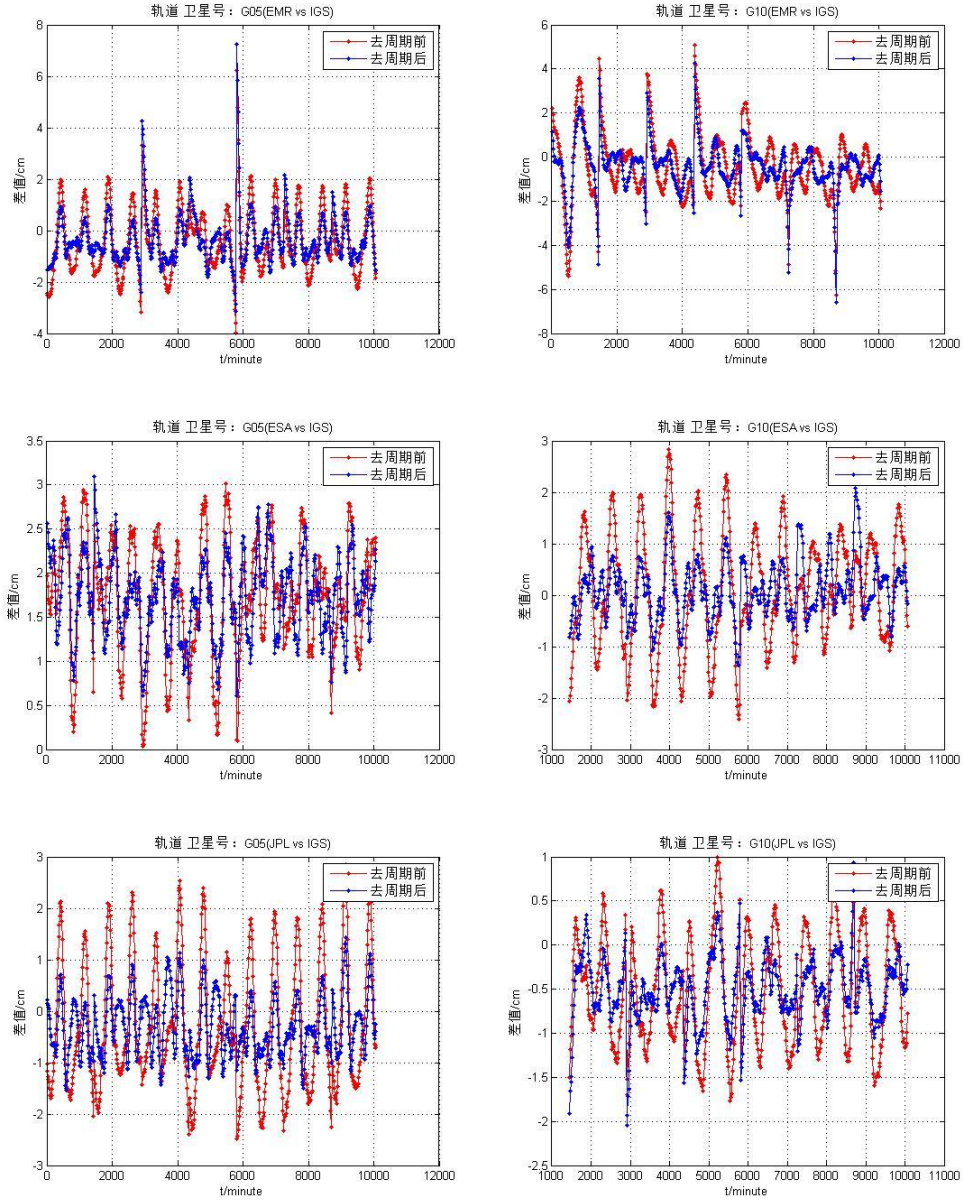


图 4-11 精密轨道去周期前后偏差对比

(2) 均值和标准差前后变化

从图 4-10 和图 4-11 可以看出，去除主要周期后，在消除系统性偏差的前提下，分析中心精密钟差和精密轨道数据与 IGS 最终产品之间的差值，较去除主要周期之前，有一定程度的减小，进一步分析去周期前后两者差值的均值和标准差的变化情况，用去周期后的减去周期前的，均值变化见图 4-12，标准差变化见图 4-13。

a) 钟差

b) 轨道

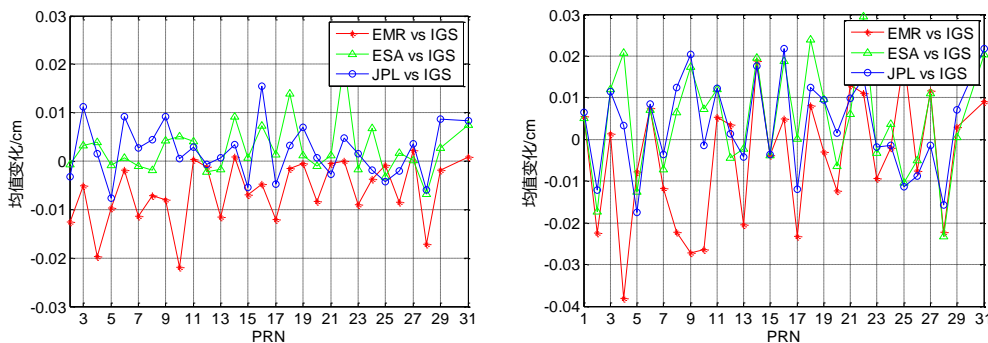


图 4-12 a)钟差 b)轨道去周期前后偏差均值对比
标准差变化如下图:

a)钟差

b)轨道

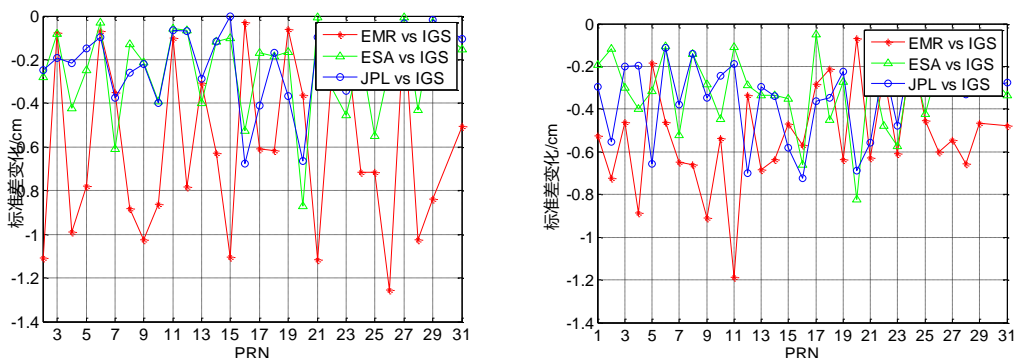


图 4-13 a)钟差 b)轨道去周期前后偏差标准差变化

可见，去周期前后均值在零值附近摆动，而标准差对于绝大多数卫星而言变小，说明一致性得到提高。

对所有卫星 1760 周至 1769 周标准差变大变小的数目进行统计，得下表：

表 4-5 钟差标准差变化情况统计

ACS \ Week	EMR vs IGS		ESA vs IGS		JPL vs IGS	
	变小	变大	变小	变大	变小	变大
1760	30	0	30	0	30	0
1761	30	0	30	0	30	0
1762	30	0	30	0	30	0
1763	29	1	29	1	29	1
1764	29	1	29	1	29	1
1765	30	0	29	1	29	1
1766	30	0	30	0	30	0
1767	30	0	29	1	30	0
1768	29	1	29	1	30	0
1769	29	1	29	1	29	1

表 4-6 轨道标准差变化情况统计

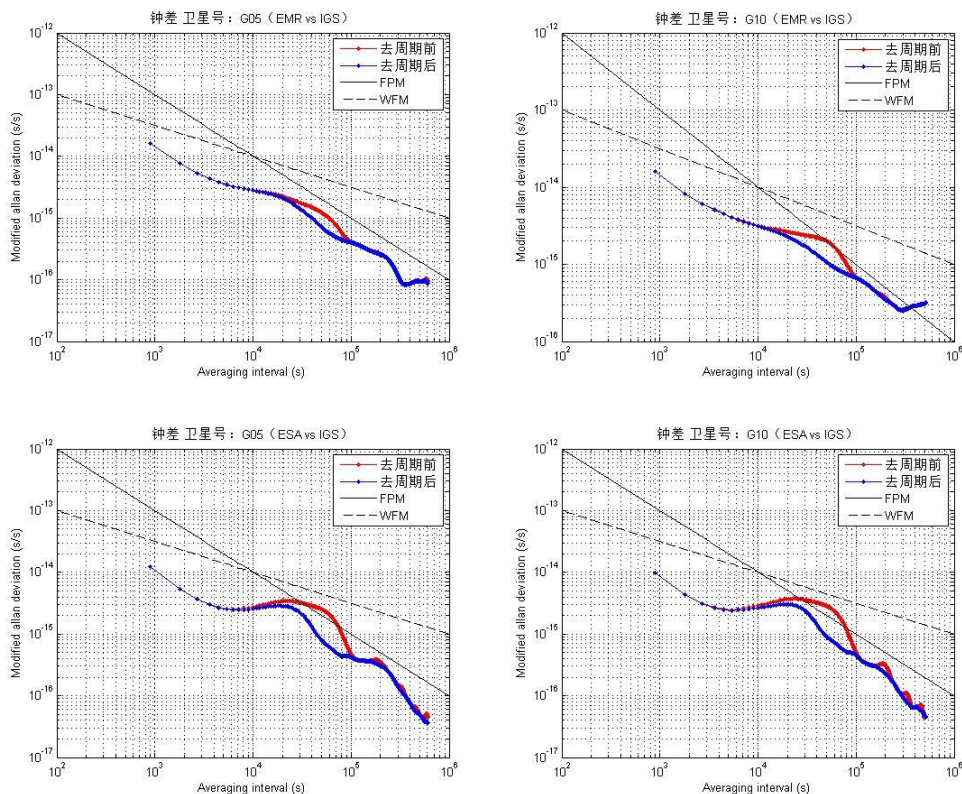
ACS \ Week	EMR vs IGS		ESA vs IGS		JPL vs IGS	
	变小	变大	变小	变大	变小	变大
1760	31	0	31	0	31	0

1761	31	0	31	0	31	0
1762	31	0	31	0	31	0
1763	31	0	31	0	31	0
1764	31	0	31	0	31	0
1765	31	0	31	0	31	0
1766	31	0	31	0	31	0
1767	31	0	31	0	31	0
1768	31	0	31	0	31	0
1769	31	0	31	0	31	0

由表 4-5 中钟差标准差变化情况统计结果可得, 对所有统计数据而言, 标准差变小比例达到 98%, 由表 4-6 中轨道标准差变化情况统计结果可得, 对所有统计数据而言, 标准差变小比例达到 100%, 说明去周期后, 分析中心精密钟差和精密轨道数据与 IGS 最终产品的一致性变好。

(3) 修正 ALLAN 标准差

进一步计算了去周期前后, 分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品随机性偏差的修正 ALLAN 标准差, 钟差结果如下图:



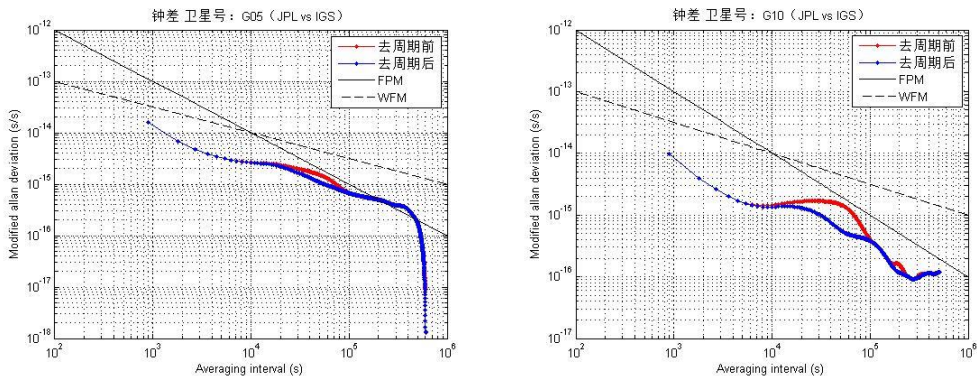
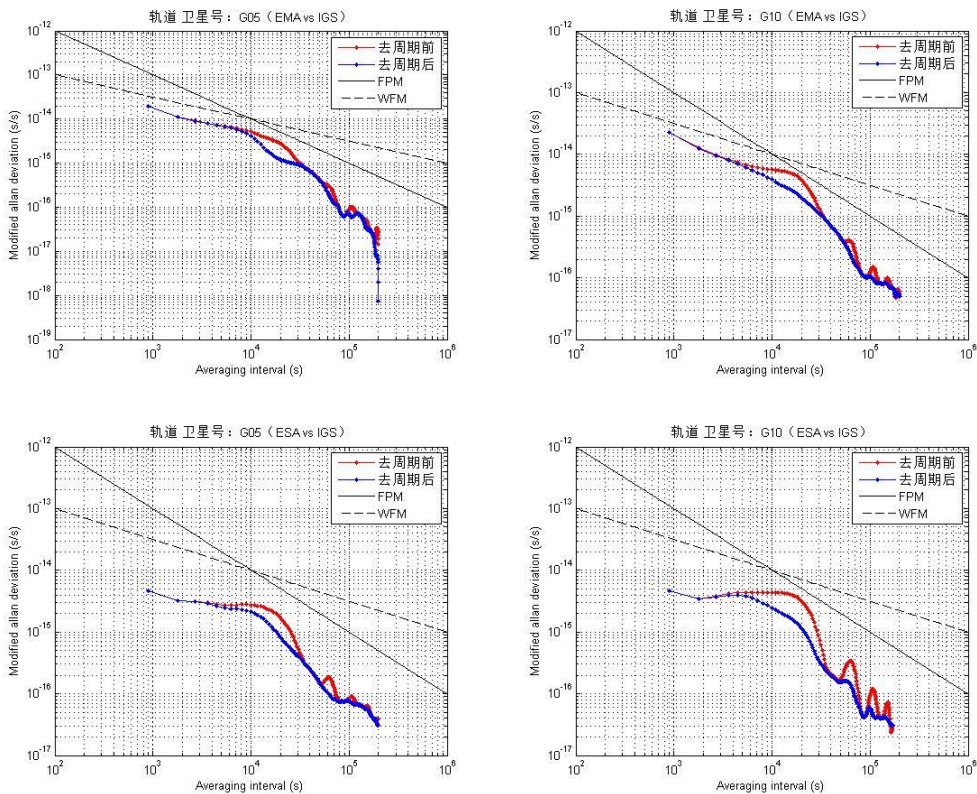


图 4-14 去周期前后钟差偏差修正 Allan 标准差对比

图 4-14 显示了 PRN05 和 PRN10 卫星在去除主要周期前后，分析中心精密钟差与 IGS 最终产品之间偏差的 MDEV 的变化情况，发现去除周期项后，10000~100000s 之间的 MDEV 发生明显变化，表明周期性偏差在精密钟差中确实存在，且影响了时间间隔在 10000~100000s 的修正 Allan 标准差；

轨道结果如下图：



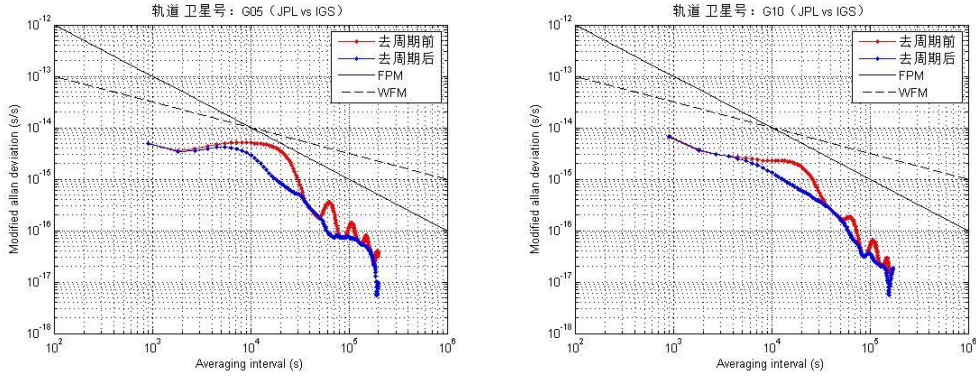


图 4-15 去周期前后轨道偏差修正 Allan 标准差对比

图 4-15 显示了分析中心精密轨道与 IGS 最终产品之间偏差的 MDEV 的变化情况，发现去除周期项后，3000~30000s 之间的 MDEV 发生明显变化，表明周期性偏差在精密轨道中确实存在，且影响了时间间隔在 3000~30000s 的修正 Allan 标准差。总体而言，去周期后修正 Allan 标准差都更趋于稳定。

4.5 小结

通过快速傅里叶变换频谱分析和最小二乘频谱分析的方法研究了两者差异中存在的周期项，从而比较了去除周期前后，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品差值的变化情况。得到如下结论：

- 1) 快速傅里叶变换频谱分析和最小二乘频谱分析的结果均表明，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品偏差中均存在 43200s 左右的周期性偏差；
- 2) 去周期后，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品随机性偏差的均值仍在零值附近摆动，但标准差绝大多数变小，说明一致性变好。
- 3) 去周期后，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品随机性偏差的修正 ALLAN 标准差趋于稳定。

第5章 总结与展望

5.1 研究内容总结

本文利用最小二乘频谱分析和快速傅里叶频谱分析方法主要研究了 IGS 分析中心提供的精密钟差和轨道数据和 IGS 最终精密钟差和轨道产品之间在去除系统性误差后的周期性差异，并对去除周期性差异前后数据进行了比较分析。

1) 详细介绍了 IGS 的组织结构和产品，阐述了精密单点定位的基本原理，并分别利用分析中心产品和 IGS 最终产品进行单点定位的实例计算，从而比较两者在定位应用上存在的差异。实际计算结果表明，对于 BJFS 站、SHAO 站以及 WUHN 站而言，使用分析中心精密钟差和精密轨道数据与使用 IGS 最终产品的精密单点定位结果，在 NEU 三个方向上的差值均未超过 1cm，说明同一分析中心的轨道和钟差产品具有一致性和自洽性，用户完全可以使用单个分析中心的成套数据进行精密单点定位计算。

2) 对分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品之间的差异进行了比较分析，通过原始数据做差，结果反映了分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品之间的差异，并对差异产生的原因进行了分析，同时，发现两者之间的钟差和轨道产品均存在周期性差异。

通过坐标转换，去除分析中心与 IGS 最终轨道间系统误差的方法，能使一定程度减小两者残差平均值和 RMS。将 2013 年 09 月 29 日至 10 月 12 日这 14 天数据求得的转换参数，应用于 2013 年 10 月 13 日至 10 月 26 日这 14 天的轨道数据，进行坐标转换，转换后分析中心与 IGS 最终轨道残差平均值和 RMS 均变小。由于 IGS 发布最终星历具有一定的延迟性，用户若想通过分析中心轨道产品，提前得到与 IGS 最终产品一致性更高的轨道数据，可使用此方法。

另外，相较于 EMR 和 ESA，JPL 与 IGS 之间的轨道产品一致性更好，由于 IGS 发布最终星历的延迟性，在 IGS 发布最终星历之前，用户自行综合时应给予 JPL 的轨道数据更大的权重。

3) 通过快速傅里叶变换频谱分析和最小二乘频谱分析的方法研究了两者差异中存在的周期项，从而比较了去除周期前后，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品差值的变化情况，并得到如下结论：

① 快速傅里叶变换频谱分析和最小二乘频谱分析的结果均表明，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品偏差中均存在 43200s 左右的周期性偏差。

② 去周期后，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品随机性偏差的均值仍在零值附近摆动，但标准差绝大多数变小，说明一致性变好。

③ 去周期后，分析中心精密钟差和轨道产品与 IGS 最终产品随机性偏差的修正 ALLAN 标准差趋于稳定。

这对进一步提高 IGS 产品综合的精度有重要意义。

5.2 下一步工作及展望

基于本文研究的内容，尽管取得了一定的结论，但本文的研究还有很多不足之处，仍然需要在以下几个方面进行深入的探索和研究：

1) 本文所选数据仅限于 1760 周至 1769 周共 10 周的数据，时间跨度比较短，若短时间内数据质量存在问题，会对结果有较大的影响，因此为了得到更可靠的结论，需要使用更长时间跨度的数据，对结论进行进一步的验证。

2) 本文仅对 GPS 卫星的精密钟差和轨道数据进行了研究，下一步可以对 GLONASS 等系统卫星的精密钟差和轨道数据在分析中心和 IGS 最终产品之间的差异特性进行研究，研究其它系统是否也存在相同的结论。

3) 本文虽然通过对分析中心精密钟差和轨道产品和 IGS 最终产品之间的差异进行了研究，且得到了一定的结论，但得到的结论在 IGS 产品综合中的应用还需要比较深入的探索，以使本文的研究成果有更大的应用价值。

致谢

时光飞逝，转眼我在同济大学的研究生生活即将接近尾声，怀着求知的心情我走进了同济大学测绘与地理信息学院，两年多来的充实生活历历在目。

首先要感谢我的导师王解先教授，在我困惑不解时，您耐心引导，让我开始慢慢领悟到科研的魅力。在我瓶颈期时给我指明方向，让我茅塞顿开。您不仅在我的学业上给予了我很多帮助，并且时刻关心我的生活，使我在这个陌生的城市感受到巨大的温暖。两年多时间我在学术和思想上的成长和提高，都离不开王老师的帮助和教诲，使我终身受益。

感谢陈俊平老师，无论在学习还是生活中您都给予了我很大的帮助。您在我遇到问题时您耐心答疑，使我在学术道路少走了好多弯路。您平易近人的人格魅力对我影响深远。这篇文章是在两位导师细心的指导下完成的，在此谨向您们表达出我最真挚的谢意！

感谢测绘学院每一位辛勤工作的老师，是你们每日辛勤的工作才能使我们的学习生活有条不紊的进行。特别感谢伍吉仓老师、李浩军老师、沈云中老师、李博峰老师等给我在学习和生活上的指导和帮助。

感谢张益泽师兄在科研上给予我的莫大帮助，感谢王君刚师兄在我学习对流层延迟模型时给予我的热心指导，感谢杨飞师兄在我研究海潮基面传递时给予我的帮助，感谢张益泽师兄、赵婧文师姐、卢娟师姐、张丽等，让我的日常生活充满欢乐，另外感谢教研室的李乃一、廖汐琳、廖敏言、朱聪聪、王岩、鲍金、肖晶鑫等，无论是学习还是生活上，无论是食堂还是教研室，我们都充满欢乐。

感谢我亲爱的父母。您们无私地照顾关心我的生活，总是尽您们最大的努力满足我的要求。为了我的学习与今后的工作，您们付出了太多太多。

感谢 15 级研究生常阳、吴磊以及其他班级所有的同学们，相聚是缘，两年半的时间我们彼此相识相知，交流玩耍，对我是一笔非常宝贵的财富。

感谢我亲爱的兄弟姐妹们，以及在我身边陪伴我的所有我爱的好朋友和亲人，有你们默默的支持和陪伴，才有我今天的所有收获和成果，我会继续努力，不忘初衷，真诚的希望你们所有人都平安幸福！

2018 年 03 月

个人简历、在读期间发表的学术论文

个人简历:

严宇, 男, 1993 年 10 月 27 日生

2015 年 6 月毕业于南京工业大学测绘工程学院, 获学士学位。

2015 年 9 月起于同济大学测绘与地理信息学院攻读硕士学位。

已发表论文:

[1]严宇,王解先.激光扫描点云数据的圆柱拟合方法[J].测绘科学,2018(06):1-8

参考文献

- [1] Oliver Montenbruck, Peter Steigenberger, Lars Prange, Zhiguo Deng, Qile Zhao, Felix Perosanz, Ignacio Romero, Carey Noll, Andrea Stürze, Georg Weber, Ralf Schmid, Ken MacLeod, Stefan Schaer. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(7).
- [2] 张国安, 王秀君, 徐菊生. 国际 GPS 服务机构(IGS)的现状与最新进展[J]. *防灾减灾工程学报*, 2003, 02: 111-114.
- [3] 苏芸婕. IGS 服务数据的智能获取与工程应用[D]. 东南大学, 2017.
- [4] 季善标, 朱文耀, 熊永清. 精密 GPS 卫星钟差的改正和应用[J]. *空间科学学报*, 2001(01): 42-48.
- [5] 陈康慷, 徐天河, 杨玉国, 蔡洪亮, 陈国. iGMAS GNSS 钟差产品综合与评估[J]. *测绘学报*, 2016, 45(S2): 46-53.
- [6] 陈康慷. IGS 分析中心轨道/钟差产品综合及网解模式动态精密单点定位研究[D]. 长安大学, 2014.
- [7] 杨元喜, 文援兰. 卫星精密轨道综合自适应抗差滤波技术[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2003(11): 1112-1119.
- [8] 陈康慷. IGS 分析中心轨道/钟差产品综合及网解模式动态精密单点定位研究[D]. 长安大学, 2014.
- [9] 常志巧, 郝金明, 张成军. GPS 精密星历的外推精度分析[J]. *测绘工程*, 2006(02): 27-29+39.
- [10] 黄观文, 张勤, 许国昌, 王利. 基于频谱分析的 IGS 精密星历卫星钟差精度分析研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2008(05): 496-499.
- [11] 杨凯, 姜卫平. IGS 精密钟差精度分析[J]. *测绘信息与工程*, 2009, 34(05): 11-12.
- [12] 魏娜, 施闯, 李敏, 邹蓉. IGS 产品的一致性分析及评价[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(11): 1363-1367.
- [13] 徐进军, 付孙钟. 频谱分析在周期拟合中的应用[J]. *测绘信息与工程*, 2001(03): 20-22+26.
- [14] 邢鑫. 基于快速傅里叶变换频谱细化算法的研究[D]. 湖北工业大学, 2013.
- [15] Witold Glowacz, Zygfryd Glowacz. Diagnostics of separately excited DC motor based on analysis and recognition of signals using FFT and Bayes classifier[J]. *Archives of Electrical Engineering*, 2015, 64(1).
- [16] 杨丽娟, 张白桦, 叶旭桢. 快速傅里叶变换 FFT 及其应用[J]. *光电工程*, 2004(S1): 1-3+7.
- [17] 祁才君, 张圣训. 周期信号频谱分析应注意的问题[J]. *测控技术*, 1999(04): 52-54.
- [18] 尹晖, Spiros D. Pagiatakis. 最小二乘谱及其在超导重力观测数据分析中的应用[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005(07): 613-616.
- [19] 张斌, 欧吉坤, 袁运斌, 郝明. 一种小波与谱分析结合的 GPS 精密卫星钟差拟合方法研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007(08): 715-718.
- [20] 辛健. 基于小波和谱分析的 GPS 精密卫星钟差预报研究[D]. 西南交通大学, 2016.
- [21] Heinz Seder. study of GPS satellites clock's behavior[D]. Department of Physics and Earth Science, 2008.
- [22] 刘经南, 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位技术探讨[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2002(03): 234-240.
- [23] 李博峰, 葛海波, 沈云中. 无电离层组合、Uofc 和非组合精密单点定位观测模型比较[J]. 测

绘学报,2015,44(07):734-740.

[24]陈刚,赵斌,胡友健,潘雄.无电离层延迟组合 GPS 数据的小波预处理方法研究[J].测绘学报,2009,38(06):477-481.

[25]蔡昌盛,戴吾蛟,匡翠林,朱建军.利用 UofC 消电离层组合的 GPS/GLONASS 精密单点定位研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2012,37(07):827-830.

[26]王兴冰,黄劲松.GPS/BDS 网络 RTK 非组合模型数据处理方法[J].导航定位学报,2017,5(04):92-97.

[27]江楠.精密定位若干误差分析及实时精密单点定位研究[D].长安大学,2013.

[28]郭金运,徐泮林,曲国庆.GPS 接收机天线相位中心偏差的三维检定研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2003(04):448-451.

[29]张清鸾.基于相对论效应的 GPS 卫星钟差预报模型研究[D].昆明理工大学,2015.

[30]张帆,许承权.GPS 天线相位绕轴误差及其对 PPP 的精度影响分析[J].测绘信息与工程,2011,36(06):13-14.

[31]Mohamed Elsobeiey,Ahmed El-Rabbany. Impact of second-order ionospheric delay on GPS precise point positioning[J]. Journal of Applied Geodesy,2011,5(1).

[32]叶世榕,张双成,刘经南.精密单点定位方法估计对流层延迟精度分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2008(08):788-791.

[33]马德强. GNSS 接收机天线相位中心误差改正方法研究[D].长安大学,2014.

[34]殷海涛,李杰,马丕峰,许丹.固体潮模型对 GPS 时间序列的影响研究[J].大地测量与地球动力学,2009,29(02):48-52.

[35]魏二虎,刘文杰,WEI Jianan,金双根,刘经南.VLBI 和 GPS 观测联合解算地球自转参数和日长变化[J].武汉大学学报(信息科学版),2016,41(01):66-71+92.

[36]刘洋,易东云,王正明.地心惯性坐标系到质心轨道坐标系的坐标转换方法[J].航天控制,2007,02:4-8.

[37]CHEN JunPing,ZHANG YiZe,ZHOU XuHua,PEI Xiao,WANG JieXian,WU Bin. GNSS clock corrections densification at SHAO:from 5 min to 30 s[J]. Science China(Physics,Mechanics & Astronomy),2014,01:166-175.

[38]牛丽娟.测量坐标转换模型研究与转换系统实现[D].长安大学,2010.

[39]李平,卢文喜,杨忠平.频谱分析法在吉林西部地下水动态预报中的应用[J].水文地质工程地质,2005(04):70-73.

[40]曹伟丽.快速傅里叶变换的原理与方法[J].上海电力学院学报,2006(02):192-194.

[41]林艳.傅里叶变换和小波分析在地震勘探中的处理[D].成都理工大学,2012.

[42]肖飞.频谱分析仪中关键技术研究及其 FPGA 实现[D].成都理工大学,2016.

[43]胡丽莹,肖蓬.快速傅里叶变换在频谱分析中的应用[J].福建师范大学学报(自然科学版),2011,27(04):27-30.

[44]陈俊平,周建华,严宇,陈倩,王彬.GNSS 数据处理时空参数的相关性[J].武汉大学学报(信息科学版),2017,42(11):1649-1657.

[45]Spiros D. Pagiatakis. Least Squares Spectral Analysis and Its Application to Superconducting Gravimeter Data Analysis[J]. Geo-Spatial Information Science,2004,04:279-283.

[46]杨赛男,陈俊平,张益泽,裴霄,余伟,谢益炳.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,2014,02:169-174.

[47]A practical approach for near infrared spectral quantitative analysis of complex samples using partial least squares modeling[J]. Science in China(Series B:Chemistry),2009,07:1021-1027.

[48]李进超,邓兆祥,姜艳军,杨维军.基于非均匀采样的频谱分析和弱信号检测[J].数据采集与处理,2012,03:320-326.