

# “北斗二代”地面监控站建设方案设想

李剑锋, 胡伍生

(东南大学交通学院, 江苏 南京 210096)

**摘要** 针对我国自主研发“北斗二代”导航系统建立全球范围的地面监控站面临着巨大难题的现状, 本文提出一种仅在国内建立地面监控站以实现导航卫星进行实时监控、定位、授时等功能的设计方案。对照美国 GPS 的地面部分功能, 从测定导航卫星的空间坐标、卫星钟差估计、导航电文的注入和大气数据采集四个方面分析了该设计方案的可行性, 初步得到该方案具有成本低, 满足精度要求, 实时性较强的特点。

**关键词** 北斗二代 地面监控站 方案设计 可行性

中图分类号: P228

文献标识码: B

文章编号: 1672-4097(2012)01-0003-05

## 1 引言

自主研发“北斗二代”卫星导航系统面临着诸多难题。其中, 建立全球范围的地面跟踪站就是需突破的重大难题之一。我国不像美国那样在全球范围内拥有军事基地, 中国要在海外建立“北斗二代”导航系统的地面跟踪站, 唯一的途径就是向他国租用基地。但是这种途径也有它的局限性, 一旦国际关系恶化, 这些建立在海外的地面跟踪站很有可能无法正常运作, 或者受到袭击, 从而导致整个系统的瘫痪。那么, 能不能仅在我国国内建立地面端的主控站、注入站和监测站就能达到对卫星星座进行实时监控, 定位, 授时等目的呢? 本文对此提出了一些构想, 并做了初步的可行性分析。

## 2 地面监控站的功能

在探究仅在国内建立“北斗二代”导航系统的地面端的可行性之前, 首先要确定地面监控站在该系统中有哪一些功能。通过分析美国的 GPS 全球导航系统地面端的功能, 可以得出全球导航系统的地面部分主要应具有以下功能。

### 2.1 提供卫星星历

在卫星导航定位中, 卫星被视为动态的已知点, 通过距离后方交会的方式来测定待测点的三维坐标。卫星的位置是依据导航卫星播发的星历由描述卫星运动及其轨道的参数计算得到, 地面监控系统的功能之一就是提供每颗卫星所播发的星历。

### 2.2 监控卫星

卫星在轨道上运行, 受到各种摄动力的影响, 其运行轨迹有可能偏离正常轨道。因此, 地面监控

站需要实时监控卫星是否沿着预定轨道运行; 若发生偏离时, 控制中心应及时调整卫星的轨道和姿态。另外, 卫星上的各种设备是否正常工作, 也需要由地面站对其进行监测和控制。

### 2.3 保持统一时间标准

地面监控系统另一重要作用是保持各颗卫星和地面监控站处于同一时间标准。这就需要地面站监测各颗卫星搭载的原子钟, 求出钟差, 然后由注入站将钟差发给卫星, 再由导航电文播发给用户。

### 2.4 数据注入

通过无线信号传输技术, 将各种参数信息注入到卫星中, 再由卫星将这些参数播发给用户也是地面监控站的功能之一。

### 2.5 收集大气信息

美国 GPS 的地面监控站还负责收集大气信息, 包括电离层信息、对流层信息和气象信息等。大气信息对改正卫星定位的误差, 提高定位精度有着十分重要的作用。

综上, “北斗二代”导航系统地面部分主要功能是收集和校正导航定位参数, 调整卫星运行轨道、姿态, 编制星历, 同时监控卫星钟的运行情况, 计算卫星钟差, 收集大气信息, 并将各种参数注入卫星。实际上, 按照“北斗二代”导航系统的设计方案, 主控站主要功能是收集各监测站数据, 通过进行数据处理, 生成导航电文和差分完好性信息, 完成任务规划与调度, 实现系统运行管理与控制等。注入站则需要完成导航电文和差分完好性信息注入, 控制管理有效荷载等功能。而监测站的主要功能是接收导航卫星信号, 并发送给主控站, 实现对卫星的跟踪、监测, 为卫星定轨和时间同步提供观测资料。

### 3 地面监控站建立方案

由于我国的国土面积较大,而且东西和南北向都有较大的跨度,可以在东西向和南北向各建立两个监控站,成正交分布。采用“一站多用”的模式,四个地面站均是监测站,同时也是注入站,再选取其中一个作为主控站,从而构成“北斗二代”导航系统的地面部分。设计方案见图 1。

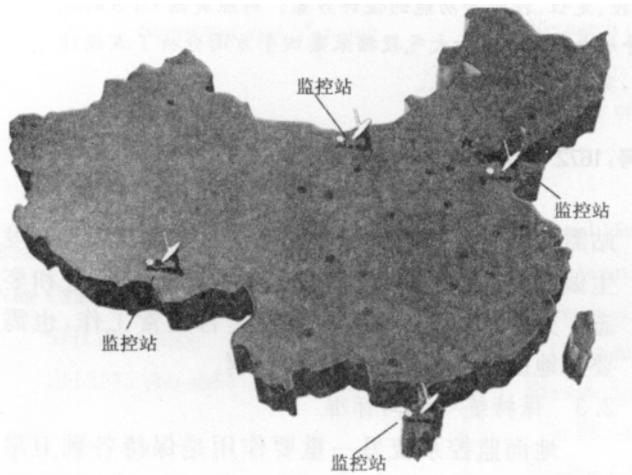


图 1 “北斗二代”导航系统的地面部分设计方案效果图

#### 3.1 解决测定导航卫星位置问题

美国的 GPS 通过分布在全球的 5 个监控站,几乎可以实时监测到所有的卫星,经过对其进行跟踪监测从而得到卫星位置信息。通过这些信息,用户便可以利用准确的卫星坐标进行定位和导航。然而,如果我国的“北斗二代”导航系统将地面基站全部建立在国内,则无法实时监测到位于我国领土上空及其附近空域以外的卫星,也就无法准确得到其位置信息。对于该问题,能通过如下方案得到解决。

“北斗二代”导航系统的卫星星座设计为 30+5 颗卫星,其中包括 5 颗地球同步卫星,27 颗中圆轨道卫星和 3 颗高轨卫星。这些卫星共分布在 7 根轨道上,包括 3 根中轨卫星轨道,3 根高轨卫星轨道和 1 根同步卫星轨道。中轨卫星高度约 21500 km,高轨卫星高度约 36000 km,加上相对于地面静止的 5 颗同步卫星,“北斗二代”导航系统的卫星星座组成了一个庞大的三维空间网络。要得到这个网络每一颗卫星的空间位置信息,我们设计的方案是:在每一颗卫星上搭载一个“北斗二代”用户接收机。首先,位于我国领土上空及其附近空域的卫星位置可以通过地面监控站准确测定,然后将这些卫星看作坐标已知的点,网络中其他卫星看作未知点,由于每个卫星都搭载有用户接收机,将卫星视为地面用户,可以通过后方交会的方法,测得这些未

知点的坐标。这就形成了一个结构强度很大的空间三维自由网,为了提高定位精度,可以利用自由网平差模型进行数据处理。另外,在这个自由网中,还有 5 颗可视为坐标已知的同步卫星,这样空间三维自由网的结构强度就大大提高了,得到卫星坐标的精度也随之提高。卫星星座的三维平差网示意图见图 2。

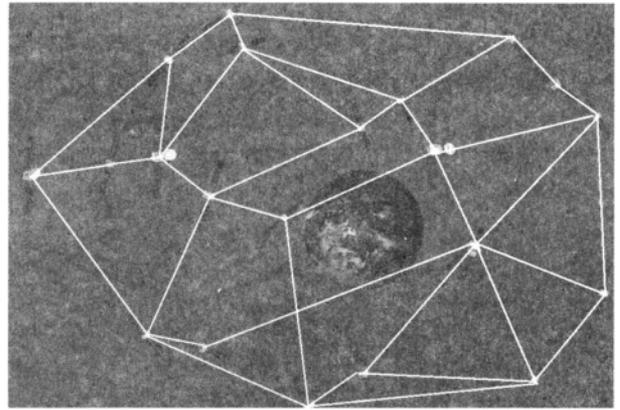


图 2 卫星星座的三维平差网示意图

对于该方案的精度是否能到达要求,可以作如下简单分析:用后方交会法测定卫星坐标,可以视为 GPS 动态相对定位。在由导航卫星组成的网络中,同步卫星和能由地面站监测到的卫星可以看作是坐标已知的点,其余卫星看作动态未知点,那么利用相对定位的原理,可以测出任意一颗卫星与多颗卫星之间的相对位置,再由其和坐标已知的卫星之间的位置关系,就可以测得该网络中所有卫星的坐标。而目前 GPS 动态相对定位测相精度最高能达到 1 cm—2 cm,与接收机位于地面的相对定位相比,利用搭载在卫星上的接收机进行定位可以忽略大气对流层、平流层以及电离层的影响,不需要考虑多路径效应,而且无线电信号在近似真空的太空中传播的折射和信号衰减几乎为零,这样就能大大提高定位的精度。卫星是运动在固定的轨道上的,实际上卫星的大致位置是通过地面站预测的,在进行相对定位的时候,卫星和接收机之间的大致距离可视为已知量,所以整周模糊度的解算能够被简化,这就确保了利用动态相对定位技术测定卫星位置的可行性。可以预测通过动态相对定位技术来测定卫星位置的精度能够达到厘米级。目前 GPS 的事后精密星历的精度能达到 5 cm,与其相比“北斗二代”导航系统的卫星位置测定的精度完全能够满足全球定位系统的要求。

该方案的优点是投入的成本低,在卫星上搭载的用户接收机价格便宜、质量小,不会给卫星增加

过多的重量。而且接收机接收卫星信号的距离较远,不需要将接收机和信号发射器严格对准。虽未得到具体的实验数据验证,但可以预测这种测定卫星位置的方法,有可能比地面监测站直接监测获取卫星位置的精度更高。

### 3.2 解决估计卫星钟差问题

全球卫星导航定位系统要求具备统一的时间标准。虽然卫星上都装有高精度的原子钟,但是各颗卫星的原子钟以及地面监控站的原子钟却不一定是严格同步的。另外,由于原子钟本身存在一定的误差,这种误差会随着时间的积累而增加,所以各卫星钟与标准时间的钟差是一个随时间而变化的量,这就需要地面监控站实时的监测卫星的时钟的运行情况。全球卫星导航定位系统的时间系统一般是以地面监控站的原子钟为标准的,即人为固定该时钟为标准时间。为了达到统一的时间标准,用户在使用卫星进行导航定位时需要把卫星钟的时间修正到标准时间。这就必须知道各卫星钟和标准时间的相对钟差,简称卫星钟差。并且相对钟差和绝对钟差对用户定位的影响是一致的。

目前,IGS 网站上提供的 GPS 卫星钟差是由全球均匀分布的 40 个 IGS 地面跟踪站长期监测得到的。在估计卫星钟差时,需要在观测站同时进行相位观测和伪距观测,并给定相应的先验约束。因为仅采用相位观测值不能进行卫星钟差估计,但是可以估计相对于参考历元卫星钟差的差值。而伪距观测值可以提供给相位观测值估计所需的卫星钟差参考值。

我国的“北斗二代”导航系统也可以采用类似的方法来估计卫星钟差。但是由于没有全球分布的地面跟踪站,所以我们设计的方案是:将 5 颗同步卫星均匀分布在同步卫星轨道上,保证同步卫星能和所有卫星通视,如果有必要可以适当增加同步卫星的数量。另外,因为同步卫星相对于地面静止,我们可以精确测得它们的坐标,视其为已知点。由于同步卫星上搭载有接收机,可以将其视为地面跟踪站,同时进行伪距观测和相位观测,从而测得各卫星与同步卫星之间的相对钟差,而且 5 颗同步卫星之间的卫星钟差也可以通过同样的方式得到。同时,保证至少有一颗同步卫星能被分布在地面的 4 个监测站跟踪到,并对其进行钟差监测。经过多次钟差传递,最后便能够得到各颗卫星和地面监测站之间的相对卫星钟差。

在这个基础上,当卫星经过我国领土上空及附近空域时,卫星就能被地面监测站观测到,再由地面站对其进行监测,测得其相对钟差,形成多余观

测,从而能够检验卫星钟差估计是否正确,并对其进行进一步修正,达到提高卫星钟差估计的的目的。该方案的优点也是可以忽略地球大气对信号的影响,能够提高伪距观测和相位观测的精度,从而提高卫星钟差估计的精度。

### 3.3 解决注入导航电文问题

由于同步卫星和高轨卫星的轨道高度约为 36000 km,因此,能够与其通视的卫星数量就相对较多。前面已经提到过,5 颗同步卫星应该是等间隔的分布在同步卫星轨道上,以保证该系统的所有卫星都能与至少一颗同步卫星通视,如果不能,则可以考虑增加同步卫星的数量,同时还需要保证至少有一颗同步卫星能与地面监控站通视。这样,地面站就可以先将导航电文注入一颗同步卫星,并由该同步卫星把导航电文播发给其他的 4 颗同步卫星,再播发给导航卫星。经过两次传递,每颗卫星都能接收到地面站播发的导航电文。最后,再由导航卫星将导航电文播发给地面用户。在这个过程中,同步卫星实际充当了通信卫星的角色,将地面站播发的导航电文经过两次传递,最后注入到导航卫星中。卫星通信技术现在已经相当成熟,实施这个过程理论上是没有技术上的障碍,而且导航电文是由无线电波搭载,以光速传播,虽然有两次的传递过程,但产生的时间延迟是可以忽略不计的。“北斗二代”导航系统星历注入设计方案示意图见图 3。



图 3 “北斗二代”导航系统星历注入设计方案示意图

实际上,该过程不仅仅适用于导航电文的注入,地面站需要向卫星发送任何指令,都可以通过同步卫星中转从而传达到需要接收信号的卫星。例如,假如某一颗卫星偏离的正常运行轨迹,或者姿态发生倾斜,地面站可以通过这个方式将启动卫星引擎的指令发送给卫星,从而达到修正卫星轨迹或姿态的目的。

实际应用中导航电文并不一定需要实时地注入导航卫星。在 GPS 中,导航电文是由注入站直接注入导航卫星的,但是注入站并不能够实时的和所有卫星进行通信,采取的方式是等导航卫星进入注入站的通信范围内再注入导航电文。这种模式在“北斗二代”系统中也可以采用,但是要等待所有卫星都能进入我国领土上空空域并能和注入站进行通信需要较长的时间而已。所以采用由同步卫星传递导航电文并注入卫星的模式,可以达到实时向卫星注入导航电文的目的,这就比美国的 GPS 在导航电文的注入上更有优势。

### 3.4 解决大气数据采集问题

随着全球定位系统的发展,卫星定位的精度要求不断提高,大气的电离层和对流层对卫星导航定位的精度影响已经不可忽略,消除观测时的大气误差已成为一项关键技术。所以收集大气信息,再将信息传送到主控站,从而计算得到各项大气延迟改正也是地面站最重要的功能之一。按本文中“北斗二代”导航系统地面站建立方案来看,地面监控站只能直接获取到位于我国领土上空及附近空域的大气信息,要获取其他区域的大气信息则比较困难。

实际上这个问题已经得到了解决,我国的“北斗二代”导航系统最终的用户是面向全球。要将我国自主研发的全球卫星导航系统推向世界,和国际性的全球导航系统服务机构 IGS 合作是十分必要的。目前,由 IGS 电离层分析中心 (IAACs) 自主研发的全球电离层模型——全球电离层地图 (IGS GIM),可以给全球定位系统提供全球范围的电离层信息,以满足用户需求。全球电离层地图在经度和纬度上分别有  $2.5^\circ$  和  $5.0^\circ$  的空间分辨率和两小时的时间分辨率。IGS GIM 把电离层假设为一个具有 450 km 高度的单层的椭球模型。为了将 GIMs 垂直方向上的电子总数转化到倾斜方向的电子总数,提出了一个改正过后的单层模型地图函数。GIMs 提供了电离层地图格式转换的绝对电子总数,通过该地图函数就能够获取全球的大气电离层信息。

另外,Boehm 等人已经利用 ECMWF 提供的 40 年全球  $15^\circ \times 15^\circ$  分辨率的月平均气压,温度和湿度等廓线作为分析基础,采用类似动态投影函数 (VMF1) 的射线估计法计算模型系数,构建出了类似 Niell 投影函数 (NMF) 易于实现的,且与动态投影函数 (VMF1) 精度相当的全球投影函数 (GMF)。通过该函数能够计算得到全球的范围的对流层湿分量信息。再结合 Hopfield 干延迟模型或 Saastamoinen 干延迟模型,最终能计算得到全球范围的对

流层延迟信息。

$$ZTD = ZID + ZWD \quad (2-1)$$

公式 2-1 中, $ZTM$  为天顶中性层总延迟, $ZHD$  为天顶干延迟, $ZWD$  为天顶湿延迟。

通过以上两个途径便能获取全球范围的大气信息,从而为“北斗二代”导航系统在全球范围使用奠定基础。

## 4 结 论

(1) 针对我国自主研发“北斗二代”导航系统的现状——建立全球范围的地面监控站面临巨大难题,本文提出一种仅在国内建立地面监控站以实现导航卫星进行实时监控,定位,授时等功能的方案;在我国东西向和南北向各建立两个监控站,成正交分布,采用“一站多用”的模式,四个地面站均是监测站,同时也是注入站,再选取其中一个作为主控站,最终组成“北斗二代”导航系统的地面部分。

(2) 经对比分析,该方案测定卫星坐标在理论上能达到厘米级的精度,并且能够利用同步卫星作为中介,进行卫星钟差估计和注入导航电文。

(3) 对照美国 GPS 的地面部分的功能,分析了仅在国内建立“北斗二代”导航系统地面监控站的可行性。初步论证了该方案能够实现全球导航系统地面部分的各项功能,且相对在全球范围内建立地面监控站,具有成本低,满足精度要求,实时性强等特点。本文只是一种大胆的设置。

### 参考文献

- 1 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.
- 2 戴邵武, 马长里, 李宇, 代海霞. 基于“北斗二代”卫星星座设计[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(1): 1-5.
- 3 连远锋, 赵剡, 吴发林. 北斗二代卫星导航系统全球可用性分析[J]. 电子测量技术, 2010, 33(2): 15-17.
- 4 楼益栋, 施闯, 周小青, 叶世榕. GPS 精密卫星钟差估计与分析[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2009, 34(1): 88-91.
- 5 范龙, 柴洪洲. 北斗二代卫星导航系统定位精度分析与研究方法[J]. 海洋测绘, 2009, 29(1): 25-27.
- 6 黄丁发, 熊永良, 袁林果. 全球定位系统(GPS)——理论与实践[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.
- 7 Grejner-Brzezinska, Israel Kashani, Pawel Wielgosz, et al. Efficiency and Reliability of Ambiguity Resolution in Network-Based Real-Time Kinematic GPS[J]. Journal of Surveying Engineering, 2007, 133: 2(56).

(下转第 9 页)

表 1 Kalman 滤波预报精度/s

	1 h	0.5 d	1 d
RMS	8.5538E-11	9.95418E-10	1.43864E-9

基于 Kalman 滤波利用 2d 的 IGS 钟差数据进行 1 h, 0.5 d, 1 d 的钟差预报, 在短时间内可以获得亚纳秒级的预报精度, 但随着时间的增长, 预报精度逐渐降低。

## 5 总 结

基于哈达玛总方差分析计算出 Kalman 滤波的状态噪声协方差阵和测量噪声协方差阵后, 利用 Kalman 滤波进行铷钟的实时状态参数估计, 对于短期钟差参数预报, 可得到亚纳秒级精度。经本文研究表明, 基于哈达玛总方差进行卫星钟差参数估计与预报, 充分利用了原子钟噪声信息, 来对卫星钟钟差、钟速和频漂过行短期预报具有较好的结果。

### 参考文献

- 1 李黎, 匡翠林, 朱建军, 等. 基于 IGS 预报轨道实时估计精密卫星钟差[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(2): 111-116.
- 2 黄观文, 杨元喜, 张勤. 开窗分类因子抗差自适应序贯平差用于卫星钟差参数估计与预报[J]. 测绘学报, 2011, 40(1): 15-21.
- 3 郑作亚, 陈永奇, 卢秀山. 灰色模型修正及其在实时 GPS 卫星钟差预报中的应用研究[J]. 天文学报, 2008, 49(3): 306-320.
- 4 黄观文, 张勤, 王继刚. GPS 卫星钟差的估计与预报研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(6): 118-122.
- 5 郭海荣, 杨元喜, 何海波, 等. 导航卫星原子钟 Kalman 滤波中噪声方差-协方差的确定[J]. 测绘学报, 2010, 39(2): 146-150.
- 6 卫国. 原子钟时间尺度与 Kalman 滤波器[J]. 陕西天文台台刊, 1990, 13(2): 73-83.
- 7 朱祥维, 肖华, 雍少为, 等. 卫星钟差预报的 Kalman 算法及其性能分析[J]. 宇航学报, 2008, 33(3): 965-970.
- 8 郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2006.
- 9 刘利, 秦永志. GPS 卫星钟噪声类型分析[J]. 全球定位系统, 2005, (2): 27-29.
- 10 EPSTEIN M., FREED G., RAJAN J. GPS IIR Rubidium clocks; in orbit performance aspects [C]. In Proceedings of the 35th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 2003: 117-134.
- 11 BREAKIRON L. A. Kalman filter characterization of cesium clocks and hydrogen masers [C]. In Proceedings of the 34th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 2002: 511-426.

## Estimate and Predict Satellite Clock Error Based on Total Hadamard Variance

ZHU Shao-pan, ZHANG Shu-bi

(China University of Mining and Technology, Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring of SBSM, Xuzhou Jiangsu 221116, China)

**Abstract** Satellite clock error estimation and prediction are the key technique for satellite navigation systems. In this paper, satellite clock error are estimated and predicted by total Hadamard variance. The power law model was used to describe the random part of satellite clock error. A method for estimating the process noises and the observation noises of Kalman filter using total Hadamard variance was deduced. IGS observation data is analyzed to show the satellite clock error estimation and prediction method is useful. The results show that time short precision is better than 1 ns.

**Key words** satellite clock error; total hadamard variance; kalman filter; satellite clock error prediction

(上接第 6 页)

## Design of Ground Monitoring Stations of Compass Navigation Satellite System

LI Jianfeng, HU Wu-sheng

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

**Abstract** For the great difficulty of Chinese independent R&D compass Satellite Navigation System in the establishment of worldwide ground monitoring stations, in this paper, a kind of ground monitoring stations designs that only establish in the country have been proposed, which could achieve real-time monitoring satellites, positioning, timing and other functions. To contrast the functions of U. S. GPS system ground monitoring stations, the feasibility was analyzed form measuring the coordinates of the satellite navigation, estimating satellite clock error, injecting navigation message and collecting atmospheric data. The results show that the design has less cost, stronger real-time and meet the accuracy requirements. It is theoretically feasible.

**Key words** compass satellite navigation system; ground monitoring stations; scheme design; feasibility