

# 一种基于北斗三号 B2b 信号的精密单点授时方法

易卿武<sup>1,2,3</sup>, 蔚保国<sup>2,3</sup>, 王彬彬<sup>2,3</sup>, 盛传贞<sup>2,3</sup>

(1. 西安电子科技大学电子工程学院, 陕西西安 710071; 2. 卫星导航系统与装备技术国家重点实验室, 河北石家庄 050081;  
3. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北石家庄 050081)

**摘要:** 授时是卫星导航系统的基本服务之一, 在先进电子设备研制和智能时空信息服务中具有重要作用. 针对当前全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)授时方法存在的受地面共视观测站和通信网络限制的问题, 本文提出一种基于北斗三号 B2b 信号的精密单点授时方法(B2b signal based Precise Point Timing, B2b-PPT). 该方法利用北斗三号地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星播发的 B2b 信号, 结合双频伪距和载波相位观测值, 根据精密单点定位算法实时估算接收机钟差. 经过世界协调时(Universal Time Coordinated, UTC)偏差改正和硬件延迟校准后, B2b-PPT接收机对本地时钟进行驯服, 从而实现高精度时频同步. 基于 iGMAS(international GNSS Monitoring and Assessment System)观测站的实验结果表明: 使用 B2b-PPT 方法的单站授时精度为 0.58 ns, 10 h 的频率稳定度为  $6.9E-15$ ; 站间模式的授时精度为 0.33 ns, 10 h 的频率稳定度为  $1.1E-14$ . 与传统的精密单点授时方法相比, B2b-PPT 方法授时精度更高, 并且具有成本低、不依赖地面通信网络和分析中心的优势.

**关键词:** 北斗三号; B2b 信号; 精密单点授时; 授时精度; 频率稳定度

中图分类号: TN911; P228

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)04-0832-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211177

## A Precise Point Timing Method Based on BDS-3 B2b Signal

YI Qing-wu<sup>1,2,3</sup>, YU Bao-guo<sup>2,3</sup>, WANG Bin-bin<sup>2,3</sup>, SHENG Chuan-zhen<sup>2,3</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, Shijiazhuang, Hebei 050081, China;

3. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050081, China)

**Abstract:** Timing is one of the basic services of GNSS(Global Navigation Satellite System) and plays an important role in advanced electronic equipment developing and intelligent spatiotemporal information service. Current GNSS timing methods are limited to common-view station and communication network. To deal with these problems, we propose a precise point timing method based on BDS-3(BeiDou Navigation Satellite System) B2b signal, called B2b-PPT(B2b signal based Precise Point Timing), which using dual frequency observations and estimating receiver clock by precise point positioning algorithm. After UTC(Universal Time Coordinated) bias correction and hardware delay calibration, the B2b-PPT receiver disciplines the clock to realize precise time-frequency synchronization. Experimental results based on iGMAS(international GNSS Monitoring and Assessment System) stations show that the accuracy of timing using B2b-PPT method is 0.58 ns and the frequency stability at 10 hours is  $6.9E-15$  in single station mode, corresponding indicators are 0.33 ns and  $1.1E-14$  respectively in station difference mode. In conclusion, the performance of B2b-PPT method is better than traditional GNSS precise point timing method, and the B2b-PPT method also has the advantage of low cost and being independent of ground communication network and analysis center.

**Key words:** BDS-3; B2b signal; precise point timing; timing accuracy; frequency stability

## 1 引言

时间和频率是用来表征时间尺度和运动规律的 2

个相关基础物理量,也是数字地球智能时空信息服务的基本要素. 高精度的时频技术已被广泛应用于通信、

电力、金融服务、自动驾驶、航空航天等领域<sup>[1]</sup>。目前,常用的时频同步方法包括搬运钟、光纤时间传递、星地时间同步、卫星双向时间同步等<sup>[2]</sup>。与其他时频同步方法相比,基于全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的时频同步方法具有成本低、全天候、精度高等特点,在先进电子设备研制和智能时空信息服务中扮演着极为重要的角色<sup>[3-5]</sup>。

Allan 和 Weiss 于 1980 年基于全球定位系统(Global Positioning System, GPS)首次提出了共视法,其逐渐发展成为国际上通用的原子时对比法。我国也在 1987 年由多个部门联合进行了 GPS 共视法实验<sup>[6]</sup>。精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)技术的出现,为高精度时间同步提供了另外一种新的解决方案<sup>[7,8]</sup>。使用北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)的载波相位数据和精密星历进行事后处理,PPP 时间同步精度优于 0.5 ns, 10 h 的频率稳定度优于  $5 \times 10^{-14}$ <sup>[4]</sup>。基于分析中心播发的实时精密星历,采用实时 PPP 方法的时频同步效果与事后 PPP 相当<sup>[9]</sup>。与实时 PPP 方法类似,通过参考站网络估算 BDS 卫星实时钟差,使用 PPP 方法解算接收机相对于参考时的钟差,并对接收机内部时钟进行调控,能够实现一种纳秒级北斗广域高精度时间服务系统<sup>[10]</sup>。

本文首先对当前几种 GNSS 授时方法进行对比,介绍北斗三号及其 PPP 服务,包括 B2b 信号结构、实时星历使用方法,并对其精度进行评定;然后基于北斗三号 B2b 信号,设计一种不依赖地面通信网络和分析中心的精密单点授时方法;最后采用 iGMAS (international GNSS Monitoring and Assessment System) 观测站数据进行测试,验证该授时方法的授时精度和频率稳定度。

## 2 GNSS 授时方法比较

在卫星导航领域,授时与定时、时频同步是比较接近的概念,本文将定时与时频同步统称为授时。按照 GNSS 授时方法原理和实现过程,可将其分为标准单站法、差分法、事后 PPP 法和实时 PPP 法。

### 2.1 标准单站法

标准单站法是 GNSS 基本授时服务的实现方式,其原理是使用接收机伪距观测值和广播星历,根据模型改正对流层和电离层延迟,基于标准单点定位方法解算接收机坐标和钟差,改正与世界协调时(Universal Time Coordinated, UTC)的偏差,并对本地晶振进行调整,输出秒脉冲信号。当接收机位置固定时,观测方程中只剩下接收机钟差参数,使用单颗卫星就能解算接收机钟差。当接收机位置不确定时,需要至少观测 4 颗卫星用于解算接收机坐标和接收机钟差。

目前,GNSS 授时型接收机通常采用这种标准单站

方法,其授时精度为 10~20 ns<sup>[11]</sup>,主要受导航卫星广播星历误差和伪距观测值精度影响<sup>[12,13]</sup>。随着广播星历精度的逐步提升,标准单站法的效果也有望得到改善。

### 2.2 差分法

差分法是指 2 个位于不同地点的接收机同时观测 GNSS 卫星,通过组成差分观测方程来求解接收机相对坐标和相对钟差参数,并对频率源进行调整,从而达到与参考时钟同步的效果。当接收机坐标已知时,共视一颗观测卫星就能够实现时频同步,当接收机坐标未知时,则需要共视 4 颗以上的观测卫星。

由于差分观测方程消除了卫星轨道误差和卫星钟差、电离层延迟、对流层延迟、地面潮汐改正等误差项,时间同步精度要高于标准单站法。如果只使用伪距观测值,差分法时间同步精度可达到 3~5 ns<sup>[14]</sup>。当使用伪距载波相位观测值时,时间同步精度优于 1 ns<sup>[15]</sup>。随着观测站距离的增加,大气延迟等误差项相关性逐渐减弱,使得时间同步精度有所降低。此外,共视法需要借助地面通信网络来传输参考站的同步观测数据。

### 2.3 事后 PPP 法

事后 PPP 法基于单个观测站数据,使用事后精密星历文件中的卫星轨道和钟差,改正固体潮、天线相位中心偏差等系统误差,独立解算高精度接收机坐标、接收机钟差、大气延迟和模糊度参数。基于钟差数据对接收机时钟进行调整,能够实现本地时间与导航系统参考时间的同步。当 2 个观测站同时进行事后 PPP 处理,并将接收机钟差进行比对,可达到与差分法类似的站间时频同步效果。

事后 PPP 法独立解算卫星钟差,不依赖共视观测站,不受距离限制,并且精细化处理了模型中的各种误差源,其时间传递精度能够优于 1 ns<sup>[16]</sup>。但事后精密星历通常无法实时获取,这决定了该方法只适用于装备了较高精度等级原子钟的 GNSS 授时实验室。这是因为原子钟经过校准后,可在一定时间内保持稳定。

### 2.4 实时 PPP 法

实时 PPP 法与事后 PPP 法类似,区别在于是否使用实时的精密星历产品。通常情况下,实时精密星历由地面分析中心向用户通过互联网播发。用户也可以根据实时观测网络数据,自主解算卫星轨道和卫星钟差,从而建立广域高精度的授时服务系统。

当前实时精密星历产品精度较高,其中 GPS 卫星轨道径向误差优于 3 cm,卫星钟差误差优于 0.2 ns,实时 PPP 法授时精度同样优于 1 ns<sup>[17]</sup>。然而,由于实时 PPP 法仍然存在对外部精密星历产品的依赖性问题,自主解算的实时精密星历同样需要无线互联网等通信手段,不能满足特殊军事应用及地面通信网络无法覆盖的应用场景。

在上述 GNSS 授时方法中,差分法需要共视导航卫星,因此也被称为共视法。而标准单站法、事后 PPP 法和

实时 PPP 法只需要处理视野内的观测卫星,统称为全视法。综上所述,各种授时方法的技术特点如表 1 所示。

表 1 GNSS 授时方法技术特点对比分析表

授时模式	授时方法	依赖项	实现手段	授时精度
共视法	差分法	广播星历、同步观测、伪距、载波、地面通信网络	差分定位	优于 5 ns
全视法	标准单站法	广播星历、伪距	标准单点定位	10~20 ns
	事后 PPP 法	事后精密星历、伪距、载波	精密单点定位	优于 1 ns
	实时 PPP 法	实时精密星历、伪距、载波、地面通信网络	精密单点定位	优于 1 ns

### 3 北斗三号 PPP 服务

#### 3.1 PPP 服务及 B2b 信号

北斗卫星导航系统是我国着眼于国家安全和经济社会发展需求而自主建设的卫星导航系统。北斗三号则是系统建设“三步走”中的最后一步,于 2020 年全面建成,并在同年 7 月底正式运营,能够为全球用户提供导航定位和通信数传于一体的高品质服务<sup>[11]</sup>。精密单点定位是北斗三号的特色服务之一,通过地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星向地面播发 B2b 信号,并在该信号上调制状态空间表示(State Space Representation, SSR)改正数信息,当地面用户接收到 B2b 信号后,结合广播星历恢复成 B2b 实时星历,同时利用伪距和载波相位观测值实现厘米到分米级高精度定位<sup>[18]</sup>。

北斗三号 B2b SSR 改正数信息以二进制相移键控的方式调制在 B2b I 支路信号。每条电文包括信息类型、电文数据和循环冗余校验,经过低密度奇偶校验(Low Density Parity Check, LDPC)信道编码后,与同步头、卫星编号、预留位共同组成如图 1 所示的电文结构。

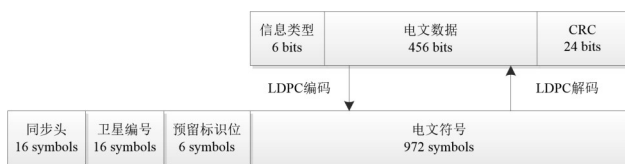


图 1 北斗三号 B2b 信号电文结构示意图

北斗三号 B2b 信号中包括卫星掩码、卫星轨道改正数及用户测距精度、码间偏差改正数、卫星钟差改正数。B2b SSR 的使用方法是:首先使用卫星掩码信息中的版本号与钟差改正数进行关联,从而确定卫星编号和对应的码间偏差信息,然后卫星轨道改正数及用户测距精度信息通过改正数版本号与卫星钟差改正数保持一致,最后基于 BDS 导航电文版本号 IODC 参数确定对应的广播星历,从而完成信息匹配。接收机用户在解码 SSR 改正数后,需要将其与 B1C 频点的广播星历进行匹配,并恢复为 B2b 实时星历。星历恢复依次分为 3

个步骤:卫星轨道改正、卫星钟差改正和码间偏差改正。

#### 3.2 B2b 星历精度评定

卫星轨道和钟差精度是评价星历的关键技术指标,其中轨道径向误差和卫星钟差精度决定了 PPP 用户的定位和授时效果。评价 B2b 实时星历轨道和钟差精度时,以德国地学中心的精密星历产品为参考值,轨道精度采用均方根误差(Root Mean Square, RMS)来描述,并将地心地固系下  $X, Y, Z$  方向分量的偏差转换到轨道坐标系下的径向、法向和切向。而卫星钟差精度评定则比较复杂,首先对待评估值与参考值做一次差,为避免基准钟不同造成的差异,对一次差数据进行星间二次差。卫星钟二次差仍然包括初始时刻伪距引入的误差,而这种误差对后续卫星钟差的影响是一致的,在精密单点定位算法中能够被模糊度参数吸收,因此采用卫星钟二次差标准差来评价其精度。

$$CLK_{STD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta clk - \overline{\Delta clk})^2}{n-1}} \quad (1)$$

其中,  $\Delta clk$  为卫星钟二次差,  $\overline{\Delta clk}$  为二次差平均值,  $n$  是钟差个数。本文分析了 2020 年第 275 天到 281 天连续 7 天的 B2b 实时星历精度,如图 2 所示。

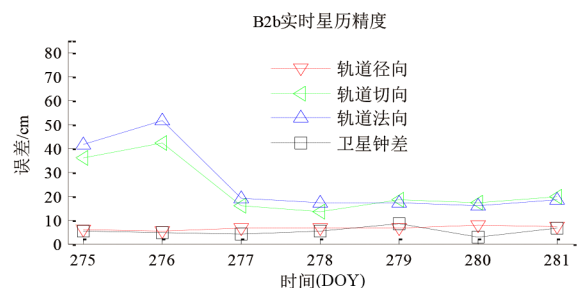


图 2 B2b 实时星历精度示意图

由图 3 可知, B2b 实时星历中轨道径向误差与卫星钟差误差相当,明显优于轨道切向和法向误差。统计连续 7 天的 B2b 实时星历,轨道径向精度为 6.70 cm,切向误差为 23.39 cm,法向误差为 25.84 cm,转换为距离单

位的卫星钟误差为 5.33 cm. B2b 实时星历轨道径向误差和卫星钟误差均为厘米级,满足 GNSS 高精度授时对于实时星历的精度需求. 从图中可以看出,轨道切向和法向误差在年积日 (Day Of Year, DOY) 276 到 DOY277 之间变化明显,这主要是由于北斗三号广播星历在这两个方向存在较大波动.

## 4 精密单点授时方法

### 4.1 工作原理

由上述分析可知,基于精密单点定位的 GNSS 授时方法具有精度高、不受距离限制等优点,但是其由于过度依赖地面分析中心和通信网络,应用场景受到限制. 北斗三号 PPP 服务在确保定位精度水平的前提下,解决了对地面分析中心和通信网络的依赖问题. 本文综合北斗三号 PPP 服务和精密单点定位授时法,设计一种基于 B2b 信号的精密单点授时方法 (B2b signal based Precise Point Timing, B2b-PPT),其工作基本原理如图 3 所示.

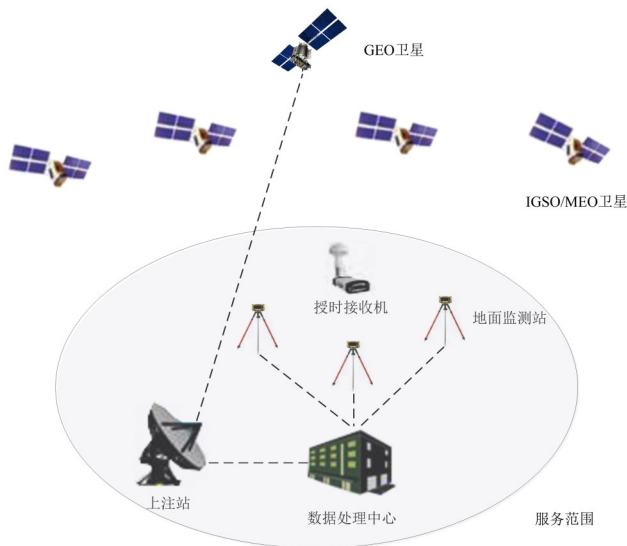


图3 基于B2b信号的精密单点授时方法工作原理示意图

基于北斗三号 B2b 信号的精密单点授时方法可分为地面段、卫星段和用户段. 地面段包括监测站、数据处理中心和上注站,监测站接收北斗导航卫星观测数据,在数据处理中心进行定轨和钟差解算,通过上注站将 B2b SSR 信息调制到上行信号,并注入到卫星段的 GEO 卫星. 卫星段由 GEO、倾斜地球同步轨道 (Inclined Geostationary Satellite Orbit, IGSO) 和中地球轨道 (Medium Earth Orbit, MEO) 卫星组成, GEO 卫星接收注入站的 B2b SSR 信息,并将其播发给地面用户,覆盖范围为中国及周边地区. 用户段为授时接收机,同时接收导航卫星观测值和 B2b 信号,基于 B2b-PPT 算法求解本地接收机钟差,对其进行调整,输出高精度秒脉冲信号

(Pulse Per Second, 1PPS) 和频率信号,从而完成精密单点授时.

### 4.2 数据处理算法

用户段主要通过 B2b-PPT 算法实现精密单点授时,采用无电离层组合伪距和载波相位作为观测方程,即

$$\begin{aligned} P_r^s &= \rho_r^s + c \cdot \delta t_r - c \cdot \tilde{\delta} t_p^s + m_r^s \cdot ztd_r + \varepsilon_p \\ L_r^s &= \rho_r^s + c \cdot \delta t_r - c \cdot \tilde{\delta} t_p^s + m_r^s \cdot ztd_r + B_r^s + \varepsilon_L \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $P_r^s$  和  $L_r^s$  分别为无电离层伪距和载波相位观测量;  $\rho_r^s$  为接收机到卫星的几何距离,卫星位置为 B2b 实时星历中的卫星轨道;  $\delta t_r$  为接收机钟差;  $\tilde{\delta} t_p^s$  为 B2b 实时星历中的卫星钟差;  $c$  为光速;  $m_r^s$  为对流层延迟投影函数;  $ztd_r$  为天顶方向对流层延迟;  $B_r^s$  为无电离层组合相位模糊度,不具备整数特性<sup>[19]</sup>;  $\varepsilon_p$  和  $\varepsilon_L$  则分别为伪距和载波相位观测噪声,包含未被模型化的其他误差. 受多路径和欺骗干扰影响的观测值被认为是粗差<sup>[20,21]</sup>,在后续数据处理中进行识别和处理.

首先,对式(2)进行线性化处理,卫星到接收机之间的几何距离  $\rho_r^s$  是坐标向量的二范数,通过一阶泰勒公式线性展开为

$$\rho_r^s = \rho_{0,r}^s + dx \cdot \Delta x + dy \cdot \Delta y + dz \cdot \Delta z \quad (3)$$

其中,  $\rho_{0,r}^s$  为卫星到接收机之间的近似几何距离;  $dx$ ,  $dy$  和  $dz$  为卫星到接收机的方向余弦;  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  和  $\Delta z$  为接收机坐标增量,即未知坐标参数. 当授时接收机固定在已知坐标点时,可对坐标参数进行约束. 当授时接收机处于静止状态时,需要将坐标当做常数参数进行估计. 当授时接收机处于运动状态时,坐标参数应作为白噪声参数进行解算.

在线性化观测方程后, B2b-PPT 算法数据处理流程依次包括数据预处理、粗差处理和参数估计. 数据预处理分为周跳探测和误差源模型化改正: 使用 TurboEdit 方法对周跳进行识别,不进行修复<sup>[22]</sup>; 改正相对论效应、相位缠绕、地球自转、固体潮、海潮、极移潮等系统误差源<sup>[23,24]</sup>. 由于 B2b 实时星历轨道指向卫星天线相位中心,因此无须对卫星天线进行相位中心改正. 采用卡尔曼滤波算法依次对每个历元的观测值进行实时处理,基于验后残差探测粗差,并对观测值进行加权处理. 卡尔曼滤波参数估计和粗差处理迭代运行,到所有观测值粗差处理完成或者迭代次数超过阈值为止,这种处理方法能够显著提高定位与授时的完好性<sup>[25]</sup>.

### 4.3 授时接收机设计

授时接收机与普通接收机相比,能够根据接收机钟差对本地时钟进行调整,并输出 1PPS 信号和频率信号. 基于北斗三号 PPP 服务和 B2b 信号,设计一种精密单点授时接收机,其内部结构和工作流程如图 4 所示.

由图 4 可知, B2b-PPT 接收机主要由射频前端模

块、信号处理模块、信息处理模块和接收机时钟模块组成。射频前端模块根据本地时钟频率信号,接收来自天线的模拟射频信号,经下变频、滤波和采样后得到中频数字信号。信号处理模块对数字信号进行解调和环路跟踪捕获,获得观测值、广播星历和 B2b SSR 信息。信息处理模块主要完成 B2b 实时星历恢复、数据预处理、粗差处理和卡尔曼滤波参数估计,输出接收机坐标、接收机钟差和对流层延迟。在接收机钟差经过 UTC 偏差改正和硬件延迟校准后,对本地时钟进行驯服,最终输出 1PPS 信号和频率信号。

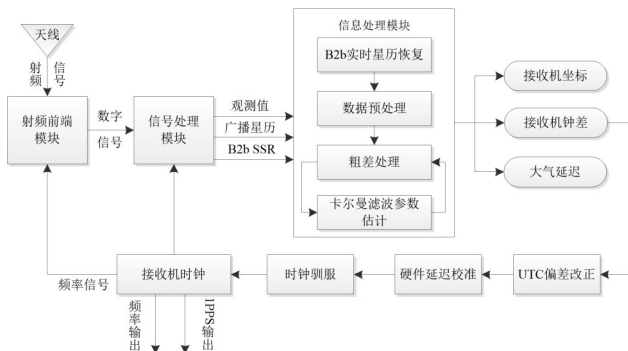


图4 B2b-PPT接收机内部结构及工作流程示意图

由于 B2b-PPT 接收机能够实时确定接收机钟差,不依赖高稳定原子钟,采用恒温晶振或者芯片式原子钟即可满足精密单点授时要求,从而降低硬件成本。根据接收机钟差对接收时钟模块进行时钟驯服,包括调频和调相 2 种方式<sup>[26,27]</sup>。对于恒温晶振来说,通常是将调整量转化为电压变化量<sup>[10]</sup>,而芯片式原子钟则通常提供了调频和调相的控制接口。

当 B2b-PPT 接收机时钟为恒温晶振时,时钟驯服分为粗调和精调 2 个阶段。在粗调阶段,根据钟差数据计算钟漂,进而得到频率偏差,并转换为电压调整量对恒温晶振进行控制。在频率调整完成后,使用软件调相的方法对相位偏差进行调整。粗调后的晶振仍然存在微小误差,根据锁相环的原理对其进行精调,从而避免调整量过大产生的相位噪声。当 B2b-PPT 接收机时钟为芯片式原子钟时,只需要根据钟差和钟漂数据计算频率调整量和相位调整量,直接对芯片式原子钟进行调整,时钟驯服过程相对简单。恒温晶振的时钟驯服精度取决于其短期频率稳定度、压控电压分辨率和电压范围,而芯片式原子钟的驯服精度则依赖频率调整范围和分辨率。在不考虑硬件限制的情况下,时钟驯服后的授时精度等价于 B2b-PPT 方法的钟差解算精度。

在授时过程中,导航信号经过电缆以及接收机通道会产生时延,通常称为硬件延迟,这会对授时结果造成影响,必须对其进行校准。硬件延迟校准方法分为绝对校准法和相对校准法。绝对校准法是将导航模拟器

与授时接收机接入同一个时频基准,授时接收机连接导航模拟器输出信号,通过比较伪距观测值差值确定硬件延迟。相对校准法是将已校准和未校准的授时接收机 1PPS 信号同时接入时间间隔计数器,测量相对时延<sup>[28]</sup>。恒温恒压环境下的接收机硬件延迟具有较好的稳定度,在授时前对其校准和改正可行的。另一个改正项是 UTC 偏差,这是当前时间系统与 UTC 时间的偏差。北斗三号 PPP 服务的时间系统为北斗时,与 UTC 存在一个整数的跳秒偏差以及由时间实验室维持的微小偏差。授时接收机也可以根据具体需求,改正到其他时间系统,如果不进行 UTC 偏差或者其他时间系统偏差改正,则同步到北斗导航系统。

## 5 实验分析

为了验证本文所提出的授时方法的效果,采用位于北京和上海的 2 个全球连续监测评估系统(iGMAS)观测站进行单站授时和站间授时测试。BJF1 站和 SHA1 站接收机类型和天线类型不相同,内部频率源均为普通的恒温晶振,基本信息如表 2 所示。由上文可知,在时钟驯服和硬件延迟校准后,授时精度主要取决于接收机钟差精度,因此本文将通过钟差 RMS 来评价授时精度。实验时间为 2020 年 DOY275 到 DOY277,基于 B2b-PPT 算法实时求解接收机钟差,采样间隔为 30 s。在分析实时钟差的过程中,使用德国地学中心的精密星历文件,以事后 PPP 的方式解算接收机钟差,并将其作为参考值。同时以实时 PPP 方法进行处理,对 B2b-PPT 方法进行比较。由于本文根据事后观测文件进行了模拟实时处理,并且使用了 B2b 实时星历和卡尔曼滤波算法,测试效果与实际的授时应用场景相当。

表 2 iGMAS 观测站信息统计表

站点	接收机类型	天线类型	经纬度
BJF1	CETC-54-GMR-4016	LEIAR25.R4	39.6°N,115.9°E
SHA1	UNICORE UB4B0I	NOV750.R4	31.1°N,121.2°E

在评价 B2b-PPT 算法求解的接收机钟差时,分别采用均方根误差 RMS 和 Allan 方差来分析钟差精度和频率稳定度。钟差 RMS 是将 B2b-PPT 实时钟差与事后钟差进行对比得到,而 Allan 方差是待评估和参考接收机钟差之差即时差数据的稳定度进行分析<sup>[29]</sup>,计算方法为

$$\delta^2(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N-2n} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)^2}{2(nt)^2(N-2n)} \quad (4)$$

其中,  $x_i$  是  $i$  时刻的时差数据;  $N$  是时差序列长度;  $t$  是时差数据的原始采样间隔;  $n$  为整数 ( $1 \leq n \leq \text{int}(N/2)$ );  $T = nt$  为 Allan 方差的采样间隔;  $\delta^2(T)$  是采样间隔为  $T$  时的 Allan 方差,其平方根为 Allan 偏差。

### 5.1 单站授时

单站授时采用单个接收机的北斗三号 B1C 和 B2a 双频观测数据、B2b SSR、广播星历等,同时以 B2b-PPT 算法求解接收机钟差,并与事后处理得到的接收机钟差进行对比.单站模式下,BJF1 站、SHA1 站的接收机钟差 RMS 和对应的 Allan 偏差如图 5~8 所示.

图 5 为连续 3 天内 BJF1 站的接收机钟差 RMS 序列,蓝色的线代表实时 PPP 方法的处理结果,而红色的线则对应 B2b-PPT 方法,两者均为扣除硬件延迟后的时间序列.从图中可以看出,与实时 PPP 方法相比,B2b-PPT 方法的钟差 RMS 峰-峰值更小,这说明该方法具有更好的稳定性.经统计,实时 PPP 方法的平均钟差 RMS 为 0.68 ns,而 B2b-PPT 方法的钟差 RMS 则为 0.60 ns.由于 B2b 实时星历中的卫星数少,数据处理时设置的最少观测卫星数是 4 颗,造成 B2b-PPT 方法从 DOY 276, 16 时开始数据缺失.图 6 为 BJF1 站的接收机钟差频率稳

定度,用 Allan 偏差来表示.在 30 s, 1 h, 10 h 采样间隔内,B2b-PPT 方法的钟差 Allan 偏差分别为  $6.14 \times 10^{-13}$ ,  $5.52 \times 10^{-14}$  和  $5.13 \times 10^{-15}$ .而实时 PPP 方法在 30 s 和 1 h 内的 Allan 偏差为  $1.55 \times 10^{-12}$ ,  $8.98 \times 10^{-14}$ .由于实时 PPP 方法的数据处理结果时长较短,无法统计 10 h 间隔及更长时间段的 Allan 偏差.

图 7 为 SHA1 站的钟差 RMS 序列,图 8 为对应的 Allan 偏差. SHA1 站的处理结果与 BJF1 站类似,采用 B2b-PPT 方法的接收机钟差 RMS 为 0.56 ns,实时 PPP 方法的钟差 RMS 为 0.58 ns.频率稳定度方面,B2b-PPT 方法在 30 s, 1 h, 10 h 采样间隔内的 Allan 偏差分别为  $8.35 \times 10^{-13}$ ,  $6.24 \times 10^{-14}$ ,  $8.69 \times 10^{-15}$ ,而实时 PPP 方法在 30 s 和 1 h 内的 Allan 偏差分别为  $1.57 \times 10^{-12}$ ,  $1.04 \times 10^{-13}$ .由此可知,单站授时模式下,B2b-PPT 方法在授时精度和频率稳定度方面均优于实时 PPP 方法,两者授时精度均优于 1 ns,频率稳定度随着采样周期变长而提高.

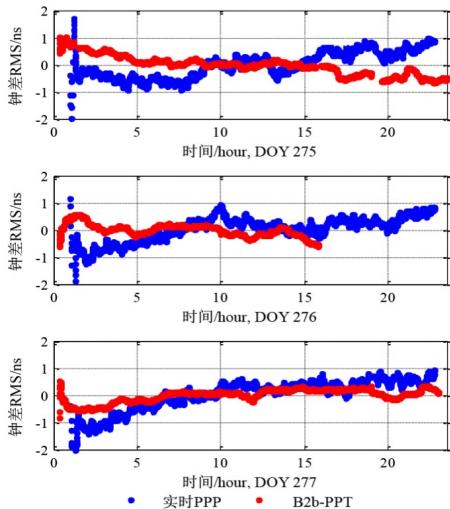


图5 BJF1 站接收机钟差 RMS

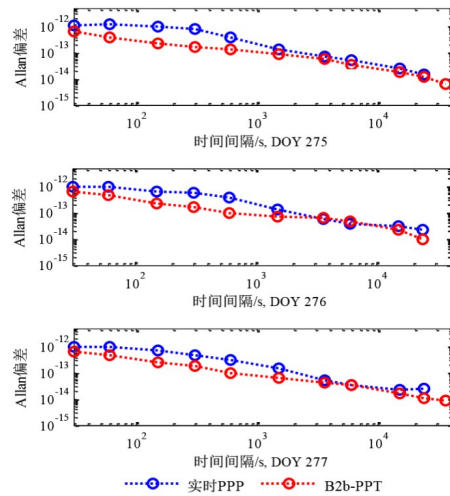


图6 BJF1 站接收机钟差 Allan 偏差

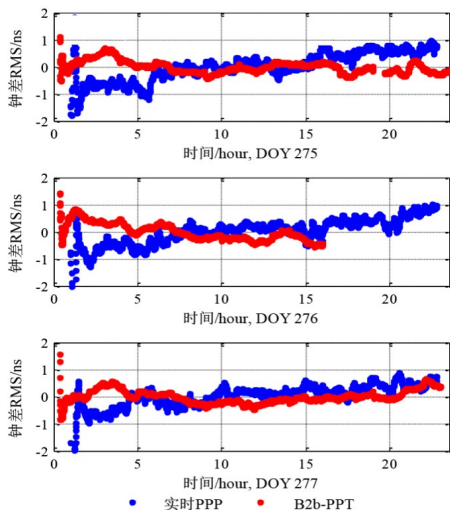


图7 SHA1 站接收机钟差 RMS

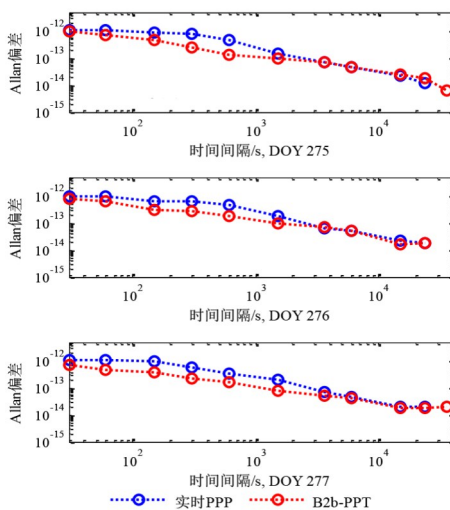


图8 SHA1 站接收机钟差 Allan 偏差

## 5.2 站间授时

在站间授时实验中首先进行单站授时,然后对站间接收机钟差作差,使得位于两地的接收机钟时频同步成为可能. BJF1 站位于北京,SHA1 站位于上海,两者相距 1058 km. 以事后 PPP 解算的接收机钟差为参考,同样采用实时 PPP 和 B2b-PPT 两种方法进行对比测试,BJF1-SHA1 站间钟差 RMS 和及其 Allan 偏差如图 9、图 10 所示.

图 9 为从 DOY 275 到 DOY 277 连续 3 天的 BJF1-SHA1 站间接收机钟差 RMS 序列. 经统计,采用 B2b-

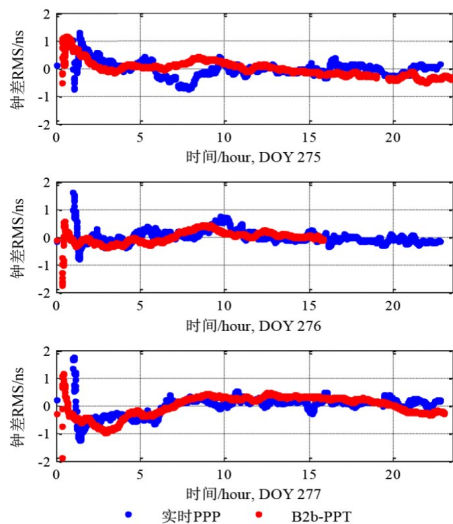


图9 BJF1-SHA1 站间接收机钟差 RMS

2 个观测站连续 3 天的钟差及频率稳定度统计结果如表 3 所示. 单站授时模式下,与实时 PPP 方法相比,采用 B2b-PPT 方法的钟差 RMS 降低了 9%,频率稳定度提高了 39%~55%. 站间授时模式下,基于 B2b-PPT 法的钟差 RMS 降低了 10%,频率稳定度提高了 23%~25%. 与单站模式相比,站间模式的频率稳定度的提升程度有所降低. 综合钟差 RMS 和频率稳定度的分析结果表明,B2b-PPT 方法授时效果优于实时 PPP 方法.

从表 3 可以得出结论,无论是实时 PPP 方法还是 B2b-PPT 方法,站间授时模式的钟差 RMS 均优于单站授时模式,提升程度达到了 43%. 这是由于站间钟差消除了由卫星钟差所引起的共同误差,使得站间模式的

表 3 单站授时和站间授时模型下的钟差及频率稳定度统计表

模式	授时方法	钟差 RMS	频率稳定度(Allan 偏差)		
			30 s	1 h	10 h
单站	实时 PPP	0.64ns	$1.6 \times 10^{-12}$	$9.7 \times 10^{-14}$	
	B2b-PPT	0.58ns	$7.2 \times 10^{-13}$	$5.9 \times 10^{-14}$	$6.9 \times 10^{-15}$
站间	实时 PPP	0.37ns	$1.6 \times 10^{-12}$	$8.8 \times 10^{-14}$	
	B2b-PPT	0.33ns	$1.2 \times 10^{-12}$	$6.8 \times 10^{-14}$	$1.1 \times 10^{-14}$

PPT 方法的接收机钟差平均 RMS 为 0.33 ns,而实时 PPP 方法的接收机钟差 RMS 则为 0.37 ns. 图 10 表示 BJF1-SHA1 的站间钟差频率稳定度,同样用 Allan 偏差来表示. 在 30 s,1 h,10 h 采样间隔内,B2b-PPT 方法的 Allan 偏差分别为  $1.17 \times 10^{-12}$ , $6.79 \times 10^{-14}$ , $1.14 \times 10^{-14}$ ,而实时 PPP 方法在 30 s,1 h 内的 Allan 偏差则分别为  $1.63 \times 10^{-12}$ , $8.77 \times 10^{-14}$ . 可知,站间授时模式下的 B2b-PPT 方法授时精度和频率稳定度均优于实时 PPP 方法,两者授时精度均优于 0.5 ns,频率稳定度随着采样周期变长而提高.

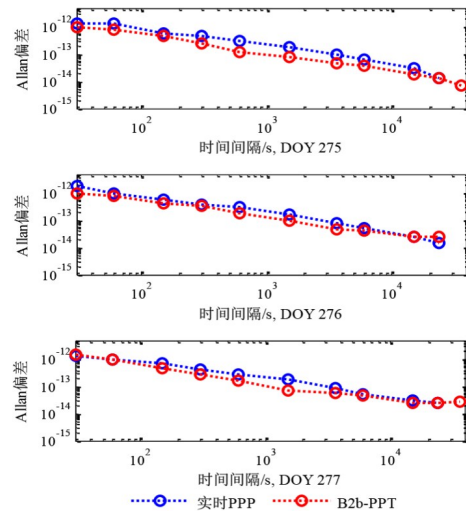


图 10 BJF1-SHA1 站间接收机钟差 Allan 偏差

钟差精度优于单站模式. 而在频率稳定度方面,与单站模式相比,站间模式的频率稳定度下降了 21%. 这是因为 2 个不同时钟之间存在频率稳定性差异,导致站间频率稳定度不如单站模式.

## 6 结论

GNSS 时频同步是先进电子设备研制和智能时空服务的关键技术和基本要素. 首先本文对几种 GNSS 授时方法进行了对比,包括标准单站法、差分法、事后 PPP 法和实时 PPP 法. PPP 授时方法不受距离限制,授时精度高,但仍然存在依赖地面分析中心和受通信网络限制等问题. 北斗三号 PPP 服务主要依靠 GEO 卫星播发的 B2b 信号来实现,能够实现高精度定位和授时. 然后本文论述了 B2b 实时星历的使用方法并对其进行精度评定,卫星轨道和钟差精度为厘米级,满足精密单点定位和授时的需求.

结合 GNSS 授时方法的特点和 B2b 信号在精密单点定位中的优势作用,本文设计了一种基于 B2b 信号的精密单点授时方法 B2b-PPT,阐述了该方法的基本工作原理,并详细论述了 B2b-PPT 数据处理算法,同时对授

时接收机的内部结构和工作流程进行了设计和说明。为了验证本文所提出的授时方法,采用 2 个 iGMAS 观测站的数据分别进行单站授时测试和站间授时测试,并统计多天的授时精度和频率稳定度。单站模式的授时精度为 0.58 ns, 10 h 的接收机 Allan 偏差为  $6.9 \times 10^{-15}$ , 站间模式的授时精度为 0.33 ns, 10 h 的接收机钟 Allan 偏差为  $1.1 \times 10^{-14}$ 。B2b-PPT 方法的授时精度和频率稳定度优于实时 PPP 方法,并且不受地面分析中心和通信网络的限制。因此,本文提出的 B2b-PPT 方法具有成本低、工作方式灵活的优势,是一种高精度无缝泛在授时解决方案,具备较高的科学研究和工程应用价值。

#### 参考文献

- [1] 漆贯荣. 时间科学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
QI G R. Fundamentals of Time Science[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 吴海涛, 李变, 武建锋. 北斗授时技术及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [3] DACH R, HUGENTOBLE U, SCHILDKNECHT T, ET AL. Precise continuous time and frequency transfer using GPS carrier phase[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition. Vancouver: IEEE, 2005: 329-336.
- [4] 张鹏飞. GNSS 载波相位时间传递关键技术与方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学, 2019.  
ZHANG P F. The Research of Key Technology and Approach for Time and Frequency Transfer Based on GNSS Carrier Phase Observation[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [5] 伍贻威, 朱祥维, 龚航, 等. 建立 GNSS 时间基准的构想和思考[J]. 电子学报, 2017, 45(8): 1818-1826.  
WU Y W, ZHU X W, GONG H, et al. Concepts and thoughts of forming a GNSS time scale[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(8): 1818-1826. (in Chinese)
- [6] 李宗扬, 刘洪琴. GPS 共视法时间同步试验[J]. 宇航计测技术, 1988, 8(5): 8-15.  
LI Z Y, Liu H Q. Time synchronization test using GPS common-view approach[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 1988, 8(5): 8-15. (in Chinese)
- [7] KOUBA J, HÉROUX P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products[J]. GPS Solutions, 2001, 5(2): 12-28.
- [8] 张继海, 董绍武, 袁海波, 等. 基于状态协方差阵加权的 GPS PPP 应用研究[J]. 电子学报, 2020, 48(11): 2196-2201.
- [9] ZHANG J H, DONG S W, YUAN H B, et al. Research of GPS PPP based on weighted state covariance matrix[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(11): 2196-2201. (in Chinese)
- [9] 葛玉龙. 多频多系统精密单点定位时间传递方法研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2020.  
GE Y L. Research on Methodology of Multi-Frequency and Multi-GNSS Precise Point Positioning Time Transfer [D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [10] 施闯, 张东, 宋伟, 等. 北斗广域高精度时间服务原型系统[J]. 测绘学报, 2020, 49(3): 269-277.  
SHI C, ZHANG D, SONG W, et al. BeiDou wide-area precise timing prototype system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(3): 269-277. (in Chinese)
- [11] 郭树人, 蔡洪亮, 孟轶男, 等. 北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 810-821.  
GUO S R, CAI H L, MENG Y N, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 810-821. (in Chinese)
- [12] 于合理, 郝金明, 田英国, 等. GNSS 单站授时系统性偏差分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(1): 30-34.  
YU H L, HAO J M, TIAN Y G, et al. Analysis of systematic bias of single station time service[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(1): 30-34. (in Chinese)
- [13] 贺成艳, 郭际, 郝振圆, 等. 北斗卫星导航系统伪距偏差特性及减轻措施研究[J]. 电子学报, 2021, 49(5): 920-927.  
HE C Y, GUO J, HAO Z Y, et al. Study on the characteristics and mitigation measurements of BDS pseudorange biases[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(5): 920-927. (in Chinese)
- [14] 许龙霞, 李孝辉, 陈婧亚. 一种高精度 GNSS 单向授时方法实现研究[J]. 时间频率学报, 2016, 39(4): 290-300.  
XU L X, LI X H, CHEN J Y. Realization of a GNSS one-way time-service method[J]. Journal of Time and Frequency, 2016, 39(4): 290-300. (in Chinese)
- [15] LEE S W, SCHUTZ B E, LEE C B, et al. A study on the Common-View and All-in-View GPS time transfer using carrier-phase measurements[J]. Metrologia, 2008, 45(2): 156-167.
- [16] 于合理, 郝金明, 刘伟平, 等. 附加原子钟物理模型的 PPP 时间传递算法[J]. 测绘学报, 2016, 45(11): 1285-1292.

- YU H L, HAO J M, LIU W P, et al. A time transfer algorithm of precise point positioning with additional atomic clock physical model[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(11): 1285-1292. (in Chinese)
- [17] GE Y L, ZHOU F, LIU T J, et al. Enhancing real-time precise point positioning time and frequency transfer with receiver clock modeling[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(1): 1-14.
- [18] NIE Z X, XU X F, WANG Z J, et al. Initial assessment of BDS PPP-B2b service: Precision of orbit and clock corrections, and PPP performance[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(11): 2050.
- [19] GU X Y, ZHU B C. An improved method of ambiguity resolution in GNSS positioning[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2019, 28(1): 215-222.
- [20] TAO H Q, WU H L, LI H, et al. GNSS spoofing detection based on consistency check of velocities[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2019, 28(2): 437-444.
- [21] LIU J, ZHAO X L. GNSS fault detection and exclusion based on virtual pseudorange-based consistency check method[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2020, 29(1): 41-48.
- [22] 张小红, 曾琪, 何俊, 等. 构建阈值模型改善 TurboEdit 实时周跳探测[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2017, 42(3): 285-292.
- ZHANG X H, ZENG Q, HE J, et al. Improving TurboEdit real-time cycle slip detection by the construction of threshold model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(3): 285-292. (in Chinese)
- [23] WANG S, WANG D, GUAN Y X. An improved ionospheric delay correction method for SBAS[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2021, 30(2): 384-389.
- [24] 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.
- [25] CAI B G, WU B Q, LU D B. Survey of performance evaluation standardization and research methods on GNSS-based localization for railways[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2020, 29(1): 22-33.
- [26] 李铎, 吴红卫, 顾思洪. GPS 驯服 CPT 原子钟方法研究[J]. *电子学报*, 2018, 46(5): 1194-1199.
- LI D, WU H W, GU S H. Study on GPS-disciplined CPT atomic clock[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(5): 1194-1199. (in Chinese)
- [27] 伍贻威, 龚航, 朱祥维, 等. 原子钟两级驾驭算法及在建立 GNSS 时间基准中的应用[J]. *电子学报*, 2016, 44(7): 1742-1750.
- WU Y W, GONG H, ZHU X W, et al. Twice atomic clock steering algorithm and its application in forming a GNSS time reference[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(7): 1742-1750. (in Chinese)
- [28] 周涓, 偶晓娟, 周晖, 等. 时频测控技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
- [29] 黄观文. GNSS 星载原子钟质量评价及精密钟差算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- HUANG G W. Research on Algorithms of Precise Clock Offset and Quality Evaluation of GNSS Satellite Clock [D]. Xi'an: Changan University, 2012. (in Chinese)

#### 作者简介



**易卿武** 男, 1975年2月出生, 湖南石门人. 研究员, 2001年于中国空间技术研究院获得硕士学位, 现任卫星导航系统与装备技术国家重点实验室副主任, 并于西安电子科技大学攻读博士学位. 主要研究方向为 GNSS 时频同步与监测评估.  
E-mail: 13933827718@139.com



**蔚保国** 男, 1966年10月出生, 内蒙古凉城人. 研究员, 工学博士. 现任中国电科集团首席科学家、中国电科54所副总工程师、卫星导航系统与装备技术国家重点实验室主任. 主要研究方向为卫星导航系统体制、地面运控、终端芯片、测试评估以及位置服务系统.