北斗三号系统互操作实现与性能分析

卢鋈¹, 宿晨庚^{1*}, 胡敏², 唐祖平³, 袁海波^{4,5}, 徐君毅⁶, 申建华⁷

1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

2. 航天工程大学航天指挥学院, 北京 101416;

3. 华中科技大学信息与通信学院, 武汉 430074;

4. 中国科学院国家授时中心, 西安 710600;

5. 中国科学院大学光电学院, 北京 100040;

6. 北京卫星导航中心, 北京 100094;

7. 卫星导航与装备技术国家重点实验室, 石家庄 050031

*联系人, E-mail: sucg@beidou.gov.cn

收稿日期: 2020-07-02; 接受日期: 2020-08-18; 网络出版日期: 2020-12-11

摘要 针对当前国际卫星导航应用从单一GPS时代发展到多GNSS(全球卫星导航系统)时代带来的新趋势和新要求, 本文从星座互操作、信号互操作、时间互操作和坐标互操作四个方面开展北斗三号系统与其他GNSS系统间的互操作设计. 在星座设计方面, 北斗三号的星座轨道高度与倾角设计与GPS、GLONASS和Galileo三大系统的星座充分互补, 全球导航卫星PDOP平均可提升37.9%; 在信号体制方面, 北斗三号通过相同频率相似频谱设计实现与其他系统的互操作, 并签署了兼容与互操作协议, 可确保用户在不改变硬件设计的情况下同时使用各大系统导航服务; 在时间基准与坐标基准方面, 北斗三号系统建立与维持了与国际上高度一致的基准体系, 实现与国际UTC、GLNT等时差偏差保持在50 ns以内, 并与国际ITRF 2014坐标参数精度保持一致. 因此, 北斗三号系统通过四个方面的努力, 实现了与其他GNSS的互操作, 可联合美俄等全球卫星导航系统为全球用户提供更优质的服务.

关键词 北斗, 互操作, 星座, 信号, 时间, 坐标

PACS: 84.40.Ua, 89.70.+c, 87.16.Xa, 43.60.Gk, 07.05.Kf

1 引言

随着美国GPS、俄罗斯格洛纳斯(GLONASS)、我国北斗系统(BDS)以及欧洲伽利略(Galileo)等GNSS系统陆续建成并提供全球服务, 互操作成为多GNSS系统共存发展、联合服务的主流趋势和要求^[1-4]. 全球卫星导航系统国际委员会(ICG)第三届大会成果文件,

首次给出了GNSS公认的互操作定义和内涵. 互操作, 是指通过使用多个全球和区域卫星导航/增强系统及其开放服务, 能在用户层面比单独依赖单个系统的开放信号获得更好的能力. 主要包括星座、信号、时间、坐标四个方面内容, 多个星座广播互操作开放信号, 将改善观测几何, 提高任何地区的终端用户精度, 并在卫星可见性较差时改善服务可用性; 互操作允许

引用格式: 卢鋈, 宿晨庚, 胡敏, 等. 北斗三号系统互操作实现与性能分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 019504

Lu J, Su C G, Hu M, et al. Analysis of the Beidou navigation satellite system: Interoperability and performance (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 019504, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0243](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0243)

使用不同系统信号进行导航, 而不显著增强额外的接收机成本和复杂性; 大地参考基准框架实现和系统时间转换应当与现有国际标准在最大可行程度上一致. 但在实际设计与实现中, 各GNSS对互操作的范畴和内涵理解虽有基本共识, 但还存有差异. 美国GPS系统认为, 互操作重点在民用L1和L5信号的互操作, 包括相同的功率水平、中心频率、调制方式、时间和大地测量参考框架(或广播偏差)、扩频码长度、码族、电文格式及编码等; 欧盟Galileo系统认为, 互操作意味着在相同链路预算条件下, 须具备共同的中心频率及共同的功率水平, 并发布开放服务信号信息^[5]; 同时, 与国际标准的地理参考框架和时间参考溯源非常重要^[6]. 俄罗斯GLONASS系统认为, 互操作包括星座、信号、时间、地理参考框架等, 信号参数或频谱有差异也可实现互操作. 结合北斗系统发展实际, 北斗系统对互操作理解和定义是: 互操作主要是指用户通过使用多个卫星导航系统信号, 能够比单独使用一个系统信号享受到更好的服务, 而不显著增加用户的接收机使用成本和接收机设计复杂性^[7]. 为保证自主知识产权, 开放信号的互操作可以在有各自独特设计的基础上, 实现频谱的相似性, 同时实现星座互补、系统间信号互操作、坐标相互转换, 为用户提供更好的服务^[8-12].

本文从北斗三号系统在星座、信号、时间、坐标四个方面的互操作设计出发, 分析了北斗三号系统为实现互操作采取的设计措施, 并通过开展监测试验与试验数据分析评估了北斗三号系统与其他GNSS系统的互操作性能.

2 星座互操作性能分析

2.1 星座互操作性能分析方法

星座互操作指当多个卫星导航系统播发公开服务信号时, 用户的观测几何、可见卫星数目等都得到极大改善, 相应的用户可用性和可靠性也会得到改善. 星座的互操作性可以通过对位置精度因子、卫星可见性和定位服务可用性的分析进行研究. 位置精度因子(Position Dilution of Precision, PDOP)值反映了卫星的几何构型, PDOP值随可见卫星个数的增加而减小; 可见卫星数与观测仰角有关. 分析PDOP值、卫星可见

性、定位服务可用性可以评估用户区域的观测条件好坏, 从而能够从侧面反映导航卫星系统的运行状况. 星座互操作分析流程图如图1所示.

卫星可见性是指地面上某点在某时刻以一定高度角能够观测到的所有卫星数目. 同一时间内覆盖到的卫星数越多, 可供选用的卫星就越多, 对导航就越有利. 卫星可见数与观测仰角直接相关, 观测仰角指的是从平面开始朝向空中方向的一个角的大小. 观测仰角主要用来控制接收机接收卫星的颗数, 因为通常低角度的卫星信号干扰都会比较大.

精度因子(Dilution of Precision, DOP)是评估卫星导航系统定位性能的重要手段之一, 精度因子提供了用户-卫星几何分布的简单描述, 几何分布越好, DOP值就越小. 在同等用户等效距离误差(User Equivalent Range Error, UERE)下, DOP值越小, 代表星座分布结构越好, 定位精度就越高. 星座互操作性能分析中通常评估位置精度因子PDOP.

定位服务可用性的定义为指定区域、时间间隔内满足一定标准的定位结果占整个时间的百分比. 可用性是系统在某一指定覆盖区域内提供可以使用的导航服务能力的标志^[13]. 系统服务可用性的计算方法, 通

图1 星座互操作性能分析流程

Figure 1 The flow of constellation interoperability performance analysis.

常假设测试时间段为 $[t_{\text{start}}, t_{\text{end}}]$, 用户机采样间隔记为 T , 则系统服务的可用性指标 CV_l 的计算公式为^[14]

$$CV_l = \frac{\sum_{k=t_{\text{start}}, \text{inc}=T}^{t_{\text{end}}} \text{bool}(EPE_k \leq f_{\text{Acc}})}{1 + \frac{t_{\text{end}} - t_{\text{start}}}{T}}. \quad (1)$$

则覆盖区内系统服务可用性的表达形式为

$$\overline{CV} = \frac{a_1 CV_1 + a_2 CV_2 + \dots + a_l CV_l}{a_1 + a_2 + \dots + a_l}. \quad (2)$$

若 k 时刻定位误差 EPE_k 满足一定标准 f_{Acc} , 则 $\text{bool}()$ 函数取1, 否则取0. a_l 表示每个区域采集的有效数据个数.

2.2 北斗三号星座方案设计

北斗三号卫星星座由3颗GEO卫星、3颗IGSO卫星和24颗MEO卫星组成, GEO卫星的轨道高度为35786 km, 分别定点于东经80°, 110.5°和140°; IGSO卫星的轨道高度为35786 km, 轨道倾角为55°, 分布在三个轨道面内, 三颗卫星升交点地理经度为东经118°; MEO卫星轨道高度为21528 km, 轨道倾角为55°, 分布于Walker24/3/1星座. 北斗系统卫星轨道高度和倾角选择考虑了与GPS, GLONASS和Galileo三大系统的星座互补.

北斗MEO卫星轨道的回归特性为7 d/13圈, 其轨

道面进动速度为11.907°/年, 换算为0.033°/d. 北斗三星座MEO轨道, 与GLONASS具有相近的轨道面进动速度. GLONASS的轨道面进动速度为12.044°/年, 换算为 $\omega_{\text{glonass}}=0.033^\circ/\text{d}$. 图2给出了四大全球卫星导航系统升交点赤经漂移率等高线.

2.3 星座互操作性能分析

下面基于北斗三星座、GPS星座、GLONASS星座以及Galileo星座的标称星座构型, 分析北斗三星座与其他三大全球卫星导航系统的互补性能. 表1给出了四大全球卫星导航系统的标称星座参数.

仿真时间为2020-01-01 00:00:00 UTC, 仿真1 d, 网格点 $5^\circ \times 5^\circ$, 仰角分别取 5° 和 15° , 分析北斗三星座标称星座与其他三大全球卫星导航系统的PDOP、星座值以及可见卫星数, 采用兼顾中国境内与境外、低纬度与高纬度的原则, 可见卫星数观测点选取中国北京、泰国曼谷、挪威奥斯陆.

针对仰角分别取 5° 和 15° 两种情况, 分析了北斗三星座联合其他三大卫星导航星座在全球区域、亚太大部分地区(55°S – 55°N , 70°E – 150°E)的导航性能, 给出了全球PDOP<4的星座值可用性、亚太大部分地区PDOP<2的星座值可用性. 表2给出了 5° 仰角情况下, 北斗三星座与其他GNSS互操作模式下的PDOP性能.

在 5° 仰角情况下, 北斗三星座联合GPS, GLONASS, Galileo星座相对于北斗三星座, 全球平均

图2 (网络版彩图)四大全球卫星导航系统升交点赤经漂移率等高线

Figure 2 (Color online) The contour lines of declination drift rate of the four major global satellite navigation systems.

表 1 四大全球卫星导航系统的标称星座参数^{a)}**Table 1** Nominal constellation parameters of the four major global satellite navigation systems^{a)}

序号	星座	标称星座组成	MEO星座标称参数
1	北斗三号	3GEO+3IGSO+24MEO	Walker 24/3/1: 21528 km, 55°
2	GPS	24MEO	Walker 24/6/1: 20196 km, 55°
3	GLONASS	24MEO	Walker 24/3/1: 19129 km, 64.8°
4	Galileo	27MEO	Walker 27/3/1: 23222 km, 56°

a) 全球卫星导航系统实际在轨卫星情况可以查阅www.csno-tarc.cn

表 2 北斗三号与其他GNSS互操作模式下的PDOP性能(仰角5°)**Table 2** The PDOP performance under interoperability between BDS-3 and other GNSS (elevation 5°)

星座组合方式	PDOP值范围	全球	亚太大部分地区
北斗三号星座	max	2.69	2.20
	mean	1.66	1.39
	min	0.96	0.96
	DOP满足程度	100% (PDOP<4)	99.85% (PDOP<2)
北斗+GPS联合导航星座	max	1.91	1.38
	mean	1.0	0.95
	min	0.74	0.74
	DOP满足程度	100% (PDOP<4)	100% (PDOP<2)
北斗+GLONASS联合导航星座	max	1.70	1.47
	mean	1.08	0.98
	min	0.73	0.73
	DOP满足程度	100% (PDOP<4)	100% (PDOP<2)
北斗+Galileo联合导航星座	max	1.75	1.75
	mean	1.01	1.01
	min	0.73	0.73
	DOP满足程度	100% (PDOP<4)	100% (PDOP<2)

PDOP可依次提升39.7%, 34.9%和39.1%, 亚太大部分地区平均PDOP可依次提升31.6%, 29.5%和27.3%.

表3给出了15°仰角情况下, 北斗三号与其他GNSS互操作模式下的PDOP性能.

在15°仰角情况下, 北斗三号星座联合GPS, GLONASS, Galileo星座相对于北斗三号星座, 全球平均PDOP可依次提升47.2%, 44.8%和48.8%, 亚太大部分地区平均PDOP可依次提升22.5%, 19.1%和24.7%.

表4给出了5°仰角情况下, 北斗三号与其他卫星导航系统互操作模式下可见卫星个数.

在5°仰角情况下, 北斗三号星座联合GPS, GLONASS, Galileo星座相对于北斗三号星座, 对于中国北

京地区, 全球平均可见卫星数可依次提升75%, 83.3%和91.6%, 对于泰国曼谷地区, 全球平均可见卫星数可依次提升71.4%, 64.3%和85.7%, 对于挪威奥斯陆地区, 全球平均可见卫星数可依次提升111%, 122%和133%.

表5给出了15°仰角情况下, 北斗三号与其他卫星导航系统互操作模式下可见卫星个数. 在15°仰角情况下, 北斗三号星座联合GPS, GLONASS, Galileo星座相对于北斗三号星座, 对于中国北京地区, 全球平均可见卫星数可依次提升54.5%, 54.5%和63.6%, 对于泰国曼谷地区, 全球平均可见卫星数可依次提升50%, 50%和66.6%, 对于挪威奥斯陆地区, 全球平均可见卫星数可依次提升85.7%, 100%和114%.

表 3 北斗三号与其他GNSS互操作模式下的PDOP性能(仰角15°)

Table 3 The PDOP performance under interoperability between BDS-3 and other GNSS (elevation 15°)

星座组合方式	PDOP值范围	全球	亚太大部分地区
北斗三号星座	max	—	4.55
	mean	2.99	1.78
	min	1.22	1.23
	DOP满足程度	97.06% (PDOP<4)	83.45% (PDOP<2)
北斗+GPS联合导航星座	max	10.73	2.78
	mean	1.58	1.38
	min	0.98	0.98
	DOP满足程度	99.95% (PDOP<4)	99.49% (PDOP<2)
北斗+GLONASS联合导航星座	max	—	4.99
	mean	1.65	1.44
	min	1.01	1.01
	DOP满足程度	99.74% (PDOP<4)	98.08% (PDOP<2)
北斗+Galileo联合导航星座	max	3.44	2.32
	mean	1.53	1.34
	min	0.96	0.97
	DOP满足程度	100% (PDOP<4)	99.81% (PDOP<2)

表 4 北斗三号与其他卫星导航系统互操作模式下可见卫星个数(仰角5°)

Table 4 The number of visible satellites under interoperability between BDS-3 and other GNSS (elevation 5°)

星座组合方式	可见卫星个数范围	中国北京	泰国曼谷	挪威奥斯陆
北斗三号星座	max	17	16	11
	mean	12	14	9
	min	11	13	8
北斗+GPS联合导航星座	max	26	26	23
	mean	21	24	19
	min	19	22	17
北斗+GLONASS联合导航星座	max	27	28	24
	mean	22	23	20
	min	18	20	17
北斗+Galileo联合导航星座	max	29	29	25
	mean	23	26	21
	min	18	23	18

综合上述仿真数据, 5°仰角情况下, 北斗三号星座联合GPS, GLONASS, Galileo星座相对于北斗三号星座, 全球平均PDOP可提升37.9%, 可视卫星数目平均可提升83.3%. 在15°仰角情况下, 北斗三号星座联合GPS, GLONASS, Galileo星座相对于北斗三号星座,

全球平均PDOP可提升46.9%, 可视卫星数目平均可提升57.5%. 这说明四大全球卫星导航星座的构型设计具备良好的互补能力, 多星座联合应用可降低单一系统星座维持操作等带来的影响, 提升单一系统星座备份的鲁棒性.

表 5 北斗三号与其他卫星导航系统互操作模式下可见卫星个数(仰角15°)

Table 5 The number of visible satellites under interoperability between BDS-3 and other GNSS (elevation 15°)

星座组合方式	可见卫星个数范围	中国北京	泰国曼谷	挪威奥斯陆
北斗三号星座	max	14	15	9
	mean	11	12	7
	min	9	10	5
北斗+GPS联合导航星座	max	20	22	17
	mean	17	18	13
	min	15	15	10
北斗+GLONASS联合导航星座	max	22	22	20
	mean	17	18	14
	min	13	14	11
北斗+Galileo联合导航星座	max	23	24	20
	mean	18	20	15
	min	15	16	12

3 信号互操作性能分析

3.1 信号互操作考虑因素

信号对互操作性的影响在终端复杂度和性能两个方面均有体现^[15,16].

(1) 接收复杂度

由于处理单系统信号的必要复杂度是不可或缺的, 当多系统的信号体制越接近, 互操作带来的终端复杂度增量越小. 极端情况下, 若两系统的信号定义相同, 即可实现可互换(Interchangeable), 互操作不会使终端复杂度增加. 现实中, 由于知识产权、业务规划等多方面的原因, 可互换并未被任何系统作为设计目标.

导航信号的定义包含多址方式、载波频率、极化方式、发射带宽、信号功率(通常关注最小接收功率)、调制方式(定义了码片波形和码速率)、扩频码、信道编码、电文格式等要素. 其中, 多址方式、载波频率、极化方式、调制方式、发射带宽等参数会影响接收机射频前端的设计, 对终端复杂度的影响最为显著. 在现有的各大GNSS系统中, 除传统的GLONASS信号采用频分多址以外, 其他系统的信号和GLONASS现代化信号均采用了码分多址方式, 从而保证系统内信号通道间的可互换性. 此外, 在GNSS系统中, 下行信号极化方式均采用了右旋圆极化, 且发射带宽远高于民用互操作信号的必要(覆盖频谱主瓣)带宽. 因此, 载波频率和调制方式参数决定信号的频谱包络, 继而影

响滤波器及采样方案的设计, 是互操作性考虑的关键因素. 由于载波频率的差异会导致频间偏差和精度降级, 普遍认为, 相同的中心频率、相近的必要带宽是构成信号互操作的前提. 扩频码、信道编码、电文格式等要素的差异, 比较容易通过软件定义来适配, 带来的终端成本增加较小. 相对而言, 扩频码和调制方式决定了相关器的形态, 且相关器工作频度与采样率匹配, 远大于电文解调和译码过程, 与终端复杂度和功耗的关联性更强.

(2) 接收性能

信号性能对互操作性能的影响是直接的. 信号性能越好, 对互操作终端的贡献就越大. 出于终端复杂度的考虑, 互操作信号通常具有相同的中心频率、相近的频谱特性, 信号的性能主要取决于信息速率、信道编码、功率电平(含分配)的设计. 诚然, 信息速率越低、编码增益越高、功率电平越大, 信号的性能越好, 但同时也面临着信息传输需求、复杂度、兼容性方面的约束, 在此不展开讨论. 普遍认为, 在总干扰受限的客观条件下, 互操作信号采用相近的接收功率电平, 有利于优化互操作终端的性能.

3.2 信号互操作性能分析

在已部署(实线)的GNSS信号中, 北斗、GPS和Galileo系统在B1/L1/E1频带、B2a/L5/E5a频带的民用信号, 以及北斗、Galileo系统在B2b/E5b频带的民用信

号, 具有良好的互操作条件. 这些互操作信号的主要参数见表6.

表6中, 最小功率为地表的最小接收功率电平. 北斗星座为混合星座, 最小功率参数对应于北斗ICD文件中MEO卫星信号最小接收功率电平(全球覆盖). 可以看到, 在公开的ICD文件中, 互操作信号最小接收功率的差异在1–2 dB范围内. 北斗、GPS和Galileo互操作信号的接收功率电平实测结果如图3所示. 图中, 编号前缀M代表北斗卫星, 编号前缀Navstar代表GPS卫星, 编号前缀GSAT代表Galileo卫星. 实测数据表明, 北斗和Galileo的地面最小接收功率电平总体相当, GPS最小接收功率比北斗、Galileo高1–2 dB, 与预期基本一致.

在B1/L1/E1频带, 北斗B1C, GPS L1C/A, GPS L1C, GalileoE1OS均采用相同的中心频率, 可以共用相同的射频前端, 具有良好的互操作基础. 除L1C/A以外, B1C, L1C, E1OS均采用了MBOC调制, 尽管它们的BOC(1,1)和BOC(6,1)分量的组合方式不同, 但是这一组合操作可以在相干积分后进行, 对终端复杂度的影响可以忽略. 此外, 对于多数成本敏感的终端, 完全可

图3 北斗、GPS和Galileo互操作信号的接收功率电平

Figure 3 Power of received interoperability signals from BDS, GPS and Galileo.

以通过接收BOC(1,1)分量来满足其性能要求. 三系统当中, 由于L1C/A信号已经得到广泛应用, GPS具有显著的先发优势. 尽管L1C/A的性能不如其他现代化的信号, 但是由于它具有码长短、主瓣带宽小等特点, 在低功耗应用领域仍然有很好的应用前景. L1C/A和L1C信号在星上相干生成, 它们之间的联合, 具有提升性能、削弱BOC同步模糊等好处. 可以预见, 在该频带信号的应用场景中, GPS信号仍然是终端的首选. 相对于GalileoE1OS信号, 北斗的B1C信号对于互操作终端

表6 互操作GNSS信号的主要参数

Table 6 The major parameters of GNSS interoperability signals

频带	系统	信号分量	中心频率 (MHz)	调制方式	信息速率 (bps)	扩频码	信道编码	最小功率 (dBW)	功率分配 (%)
B1/L1/E1	北斗	B1C数据	1575.42	BOC(1,1)	50	Weil	LDPC	-159	25
		B1C导频	1575.42	QMBOC(6,1,4/33)	0	Weil	—		75
		L1C/A	1575.42	BPSK(1)	50	Gold	无		100
	GPS	L1C数据	1575.42	BOC(1,1)	50	Weil	LDPC	-157	25
		L1C导频	1575.42	TMBOC(6,1,4/33)	0	Weil	—		75
		E1OS数据	1575.42	CBOC(6,1,1/11)	125	Random	卷积		50
B2a/L5/E5a	北斗	B2a数据	1176.45	QPSK(10)	100	Gold	LDPC	-156	50
		B2a导频	1176.45		0	Gold	—		50
		L5数据	1176.45		50	Gold	卷积	-154	50
	GPS	L5导频	1176.45	QPSK(10)	0	Gold	—		50
		E5a数据	1176.45		25	Gold	卷积	-155	50
		E5a导频	1176.45		0	Gold	—		50
B2b/E5b	北斗	B2b I路	1207.14	QPSK(10)	500	Gold	LDPC	-156	50
		B2b Q路	1207.14		500	Gold	LDPC		50
	Galileo	E5b数据	1207.14	QPSK(10)	125	Gold	卷积	-155	50
		E5b导频	1207.14		0	Gold	—		50

具有更大的吸引力. B1C和L1C都选用了码长为10230的Weil码, 相对E1OS码长仅为4092的Random码而言, 码隔离度更高. 同一族的Weil码基于相同的勒让德序列组合而成, 相对每个序列都必须独立存储的Random码, 可以节约大量的存储空间. B1C采用更低的信息速率, 更高增益的多进制LDPC编码, 数据/导频支路功率比为25/75, 性能与L1C相当. 而相比于E1OS信号的50/50, B1C信号的跟踪门限可改善1.8 dB, 在挑战性环境中的应用效果优于E1OS信号^[17]. 因此, 在B1/L1/E1频带, 北斗、GPS和Galileo系统均可实现良好的互操作, 但北斗+GPS的性能优于GPS+Galileo, 且接收机代价更小. 尽管未来的终端更多会采用北斗+GPS+Galileo的模式, 但北斗B1C信号带来的性能增益更大.

在B2a/L5/E5a频带, 北斗、GPS信号具有完全相同的中心频率、调制方式、功率配比、码型及码长, 具有高度的互操作性. B2a信号的信息速率高于L5和E5a信号, 并配合采用更高增益的多进制LDPC编码, 满足生命安全用户完好性告警需求.

在B2b/E5b频带, 北斗和Galileo信号有相同中心频率、调制方式、功率配比、码型及码长, 利于两系统的互操作. 由于业务定位不同, 北斗在采用了更高的信息速率的同时引入了更高增益的多进制LDPC编码满足精密单点定位、全球短报文、搜索救援等数据传输需求. 两系统在B2a/E5a, B2b/E5b频带的互操作信号都是相干产生, 为整个B2/E5频带信号相干接收提供了条件, 使得宽带高精度测量、超宽巷组合加速载波整周模糊成为可能.

综上所述, 在B1/L1/E1和B2a/L5/E5a频带, 北斗实现了与GPS、Galileo系统的互操作; 在B2b/E5b频带, 北斗实现了与Galileo系统的互操作. B1/L1/E1频带, 北斗与GPS信号的互操作性能优于GPS+Galileo; B2b/E5b频带, 北斗+Galileo可为全球高精度用户提供更高的服务标准. 目前, 北斗系统与GPS系统已签署了民用信号兼容与互操作联合声明, 为北斗/GNSS互操作接收机的研制和使用奠定了坚实基础.

4 时间互操作性能分析

时间互操作是GNSS互操作的基础之一^[18,19], 在ICG里设有专门的工作组(WG-D)更好地推动GNSS时间互操作的实现.

4.1 北斗系统时间定义

北斗系统时间是北斗系统运行的统一参考, 简称为北斗时, 英文为BDT. BDT采用国际单位制(SI)s为基本单位连续累计, 不闰秒, BDT起始历元为2006年1月1日协调世界时(UTC)00时00分00秒.

BDT通过UTC(NTSC)与国际UTC建立联系. BDT与UTC之间的闰秒信息在导航电文中播报. 最近一次闰秒后(UTC时间2017年12月31日23:59:59后增加一个60 s) BDT与UTC之间的整秒偏差为4 s.

4.2 BDT与UTC相对偏差分析

从上面的描述可知BDT自从2006年1月1日开始运行后不插入闰秒, 是一个连续的时间尺度, 但其与UTC之间通过UTC(NTSC)及UTC(NTSC)的国际溯源比对链路, 实现BDT向UTC的间接溯源. 按照北斗ICD的要求, BDT与UTC的偏差(模一秒)保持在100 ns以内^[20,21].

为监测BDT的实际性能, 我们利用国家授时中心时间传递型接收机进行监测, 接收机输入信号为UTC(NTSC)的10 MHz频率信号和1 PPS信号, BDT监测原理如图4所示. 监测时间为2019年1月1日–2019年11月30日. 监测实验时直接采用接收机北斗观测数据解算BDT相对于国家授时中心保持的我国标准时间UTC

图4 (网络版彩图) BDT监测原理

Figure 4 (Color online) Principle of BDT monitoring.

(NTSC)的偏差, 再通过国家授时中心的国际GNSS PPP时间比对链路以及BIPM发布的UTC-UTC(NTSC)结果进行归算, 进而得到BDT相对于UTC模一秒的偏差数据(下同).

依据BDT监测原理, 通过归算后最终获得BDT-UTC数据, 进而利用该数据对BDT的相对于UTC的性能进行分析, 主要包括BDT相对于UTC的偏差, BDT相对于UTC的频率稳定度等. 图5给出了2019年1月1日至2019年11月30日BDT相对于UTC的实际偏差, 对应的约化儒略日(MJD)为58484–58817.

从图5可见, 在实验期间, BDT相对于UTC的偏差最大值为24 ns, 最小值为−8 ns, 峰峰值差32 ns. 可见在监测时间段内, BDT总体运行稳定, 总体指标优于系统预设BDT与UTC偏差50 ns的指标要求, 但在相对UTC偏差控制上还有较大的提升空间.

实验期间, BDT相对于UTC的稳定度如图6所示.

由于BIPM公布的UTC-UTC(NTSC)数据为每5 d一个点, 因此对BDT稳定度评估时最小BDT-UTC数据

图 5 (网络版彩图) BDT相对于UTC的偏差
Figure 5 (Color online) The deviation between BDT and UTC.

图 6 BDT相对于UTC的稳定度
Figure 6 The stability of BDT relative to UTC.

间隔也是5 d. 相对于UTC, 实验期间BDT 5 d的稳定度为 8.08×10^{-15} . 不同采样间隔BDT相对于UTC的频率稳定度见表7所示.

图7和表7反映了BDT相对于UTC稳定度的变化情况, 结合图6, 我们可以看到BDT在短期和长期稳定性方面均需要不断提高. 实际实验中, BDT相对于UTC的5 d频率稳定度处于 10^{-15} 量级, 40 d以后的频率稳定度逐步接近 10^{-16} 量级.

4.3 BDT与GLNT互操作试验

BDS时间BDT和GLNASS时间GLNT互操作试验, 主要针对BDT与GLNT互操作中时差监测技术展开. BDT与GLNT时差监测技术我们采用单站法进行监测, 单站法就是采用GNSS多模接收机, 通过直接接受GNSS信号进行结算, 获得本地参考与不同导航系统时间的偏差, 再通过互差方式获得系统间时差.

BDT与UTC(NTSC)的偏差监测结果如图5所示, 峰值差32 ns. 在相同时间段内, 采用同样的接收机, 我们对GLONASS时间GLNT同时进行了监测, 监测采用的参考同样是UTC(NTSC)的10 MHz频率信号和1 PPS

图 7 国家授时中心监测的GLNT与UTC(NTSC)偏差
Figure 7 The deviation between GLNT and UTC(NTSC) monitored by National Time Service Center.

表 7 BDT相对于UTC的频率稳定度

Table 7 The frequency stability of BDT relative to UTC

Tau (d)	ADEV
5	8.08×10^{-15}
10	6.68×10^{-15}
20	4.39×10^{-15}
40	3.55×10^{-15}
80	1.94×10^{-15}

信号. 监测结果即为UTC(NTSC)-GLNT, 实际监测结果见图7.

图7中, GLNT相对于UTC(NTSC)存在一个约16 ns的变化, 这可能与GLONASS系统时间调整有关, 但总体而言GLNT保持相对比较稳定. 图8给出了BDT和GLNT相对于UTC(NTSC)试验期间的相对频率稳定度.

从图8可以看出, 在短期稳定度方面, BDT优于GLNT, 而在超过5 d采样间隔时, GLNT稳定度明显高于BDT, 且长期稳定度已经进入 10^{-16} 量级. 在GNSS时间互操作中, 要求系统时间应该具有相当的短期稳定度和长期稳定度, 但相对而言, 短期稳定度对模型预报参数产生影响更大, 这主要是因为时差预报模型产生于更新周期的需要. 在进行时差预报时, 首先关注的就是系统间时差数据, 因此在北斗和格洛纳斯时间互操作时, 我们需要计算BDT和GLNT时差. 图9为试验期间BDT与GLNT之间的时差.

从图9可以看出, 在试验期间, 两系统的系统时间

图8 (网络版彩图) BDT和GLNT相对于UTC(NTSC)的频率稳定度

Figure 8 (Color online) The frequency stability of BDT and GLNT relative to UTC(NTSC).

图9 BDT与GLNT间的偏差

Figure 9 The deviation between BDT and GLNT.

偏差在35 ns以内. 短期结果受到GLNT的影响较大, 这样的数据在北斗和格洛纳斯系统时间互操作中可预报性较差, 不利于时差预报参数的产生. 随着北斗时间性能和格洛纳斯时间性能的逐步提高, 我们将会继续开展时差预报模型的建立和模型参数产生试验, 并对模型预报精度进行进一步分析.

5 坐标互操作性能分析

坐标系统互操作是指在综合利用多个GNSS及其增强系统时, 采用监测坐标系统偏差等手段, 控制坐标基准差异对多GNSS融合导航定位的影响, 使用户获得比单独使用一个系统更好的服务^[22,23].

5.1 北斗坐标系定义

北斗坐标系简称BDCS (BeiDou Coordinate System). 北斗坐标系符合IERS规范, 与2000中国大地坐标系(CGCS2000)定义一致(具有完全相同的椭球参数). 具体定义如下:

(1) 原点、轴向及尺度定义

- 1) 原点位于地球质心;
- 2) Z轴指向IERS定义的参考极(IRP)方向;
- 3) X轴为IERS参考子午面(IRM)与通过原点且同Z轴正交的赤道面的交线;
- 4) Y轴与Z, X轴构成右手直角坐标系, 如图10所示;
- 5) 长度单位是国际单位制(SI)m.

(2) 参考椭球定义

BDCS参考椭球的几何中心与地球质心重合, 旋

图10 BDCS参考椭球

Figure 10 The reference ellipsoid of BDCS.

转轴与Z轴重合, 其定义的基本常数见表8.

5.2 北斗坐标系的建立与维护

选择74个全球分布的地面站(主要包括IGS/MGEX站和陆态网络监测站), 作为此次北斗坐标系实现的参考框架点. 74个地面站在全球各地均由分布, 包括亚欧大陆、美洲大陆、非洲大陆、南极大陆等各主要陆地, 以及太平洋、大西洋、印度洋的部分岛屿. 采用的数据时间段为2019年1月1日至4月10日共100天GNSS数据, 观测值采样间隔为30 s. 具体的解算策略是: 采用最小约束法约束31个IGS核心站ITRF2014坐标, 计算所有选取参考框架点在北斗坐标框架中坐标.

选取22个非约束ITRF2014坐标的IGS/MGEX台站, 在BDCS框架下估计结果与ITRF2014互差.

从图11可以看出, 北斗坐标框架与ITRF间在东方向和北方向差异小于1 cm, 在天方向坐标差异小于1.5 cm.

表9给出了北斗坐标框架与ITRF间坐标差值的形式误差. 可以看出, 最大三维形式误差小于1.2 cm. 假定均方根误差(RMS)为1.2 cm (实际RMS值小于此值), 则北斗坐标框架与ITRF间坐标差异优于2.5 cm (95%). 保守估计, 两者坐标差异不超过3 cm.

利用31个未参与坐标系计算的IGS非核心站解算BDCS与ITRF2014坐标转换参数, 结果见表10. 表中WGS84, PZ90-11, GTRF与ITRF坐标转换参数结果来自各系统ICG最新报告.

对比BDCS与ITRF2014间转换参数及其他卫星导航系统坐标系与ITRF间转换参数可知, BDCS与ITRF间一致性很好, 坐标转换参数精度与其他GNSS坐标

表 8 BDCS参考椭球常数

Table 8 The reference ellipsoid constant of BDCS

常数	常数值
长半轴	$a=6378137.0$ m
扁率	$f=1:298.257222101$
地心引力常数(包含大气层)	$GM=3.986004418 \times 10^{14}$ m ³ /s ²
地球自转角速度	$\omega=7.292115 \times 10^{-5}$ rad/s

框架与ITRF间坐标转换参数精度相当.

6 结论与建议

当前, 世界卫星导航兼容共用格局基本形成, 北斗与世界主要GNSS系统实现互操作, 可在不显著增加用户成本和复杂性的基础上, 为国际用户带来更优质的服务. 在北斗三号系统设计与建设过程中, 北斗在星座、信号、时间、坐标四个方面考虑了与世界主要GNSS系统的互操作设计, 实现了频谱的相似性、星座互补、系统间信号互操作、坐标相互转换.

在星座方面, 北斗三号星座联合GPS, GLONASS, Galileo星座相对于北斗三号星座, 全球平均PDOP可提升37.9%以上, 可视卫星数目平均可提升83.3%以上. 多系统互操作, 将进一步降低单一系统星座维持操作等带来的影响, 提升单一系统星座备份的鲁棒性.

在信号方面, 在B1/L1/E1和B2a/L5/E5a频带, 北斗实现了与GPS, Galileo系统的互操作; 在B2b/E5b频带, 北斗实现了与Galileo系统的互操作. B1/L1/E1频带, 北斗与GPS信号的互操作性能优于GPS+Galileo; B2b/

图 11 (网络版彩图)北斗坐标框架与ITRF间坐标差异

Figure 11 (Color online) The difference of coordinate frame between BDCS and ITRF.

表 9 北斗坐标框架与ITRF间坐标差异

Table 9 The difference of coordinate frame between BDCS and ITRF

序号	测站名称	与ITRF2014坐标差异 (m)			三维误差 (m)
		X	Y	z	
1	CHPI_3PS	-0.0006	-0.0041	0.0010	0.0042
2	MAW1_GPS	0.0003	0.0006	0.0004	0.0008
3	KOUR_8PS	-0.0023	0.0040	0.0002	0.0047
4	STHL_GPS	-0.0052	0.0012	0.0034	0.0063
5	KOKV_GPS	-0.0012	-0.0005	0.0026	0.0029
6	MADR_LPS	-0.0044	-0.0002	-0.0023	0.0049
7	CEBR_2PS	0.0076	-0.0012	0.0045	0.0089
8	EBRE_4PS	0.0091	-0.0041	0.0067	0.0120
9	AREQ_8PS	0.0033	-0.0026	-0.0018	0.0046
10	REDU_2PS	-0.0010	-0.0028	-0.0002	0.0030
11	BRUX_2PS	-0.0040	-0.0040	-0.0013	0.0058
12	KIRU_5PS	0.0004	-0.0010	-0.0031	0.0033
13	NAUR_3PS	-0.0033	0.0073	-0.0068	0.0105
14	WROC_5PS	-0.0025	-0.0026	0.0016	0.0040
15	DAEJ_3PS	-0.0015	-0.0113	0.0045	0.0123
16	CHUM_3PS	-0.0006	-0.0047	-0.0055	0.0073
17	CKIS_2PS	0.0037	-0.0039	0.0003	0.0054
18	SYDN_GPS	0.0046	-0.0039	0.0047	0.0076
19	DARW_5PS	-0.0023	-0.0018	0.0099	0.0103
20	KAT1_GPS	0.0007	-0.0026	-0.0008	0.0028
21	FAA1_2PS	0.0034	0.0016	0.0012	0.0039
22	PERT_8PS	0.0023	0.0038	-0.0048	0.0065

表 10 BDCS/WGS84/PZ90-11/GTRF与ITRF间的坐标转换参数

Table 10 The coordinate conversion parameters between BDCS/WGS84/PZ90-11/GTRF and ITRF

类型	内容	T_x (mm)	T_y (mm)	T_z (mm)	R_x (mas)	R_y (mas)	R_z (mas)	Scal (ppb)
BDCS与ITRF2014	估值	-0.37	1.12	-0.55	0.01	-0.02	0.05	0.011
	标准差	0.74	0.74	0.74	0.03	0.03	0.04	0.012
WGS84与ITRF2008	估值	-2.0	-2.0	7.0	-0.009	0.009	-0.030	-3.32
	标准差	4.0	4.0	4.0	0.037	0.039	0.039	0.64
PZ90-11与ITRF2014	估值	-5.0	-4.0	-3.0	0.035	-0.087	0.036	-0.00
	标准差	2.0	2.0	2.0	0.073	0.073	0.090	0.1
GTRF18v01与ITRF2014	估值	2.6	2.5	6.4	-	-	-	-
	标准差	-	-	-	-	-	-	-

E5b频段, 北斗+Galileo可为全球高精度用户提供更高的服务标准. 目前, 北斗系统与GPS系统已签署了民用信号兼容与互操作联合声明, 为北斗/GNSS互操作接

收机研制和使用奠定了坚实基础.

在时间方面, BDT与UTC之间通过UTC(NTSC)及UTC(NTSC)的国际溯源比对链路, 实现BDT向UTC

的间接溯源. 按照北斗ICD的要求, BDT与UTC的偏差(模一秒)保持在100 ns以内, 实际监测BDT相对于UTC的偏差最大值为24 ns, 最小值为-8 ns, 峰峰值差32 ns.

坐标方面, 北斗坐标框架与ITRF间坐标差异优于2.5 cm (95%). 保守估计, 两者坐标差异不超过3 cm. BDCS与ITRF间一致性很好, 坐标转换参数精度与其他GNSS坐标框架与ITRF间坐标转换参数精度相当.

参考文献

- 1 Yang Y X, Lu M Q, Han C H. Some notes on interoperability of GNSS (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2016, 45: 253–259 [杨元喜, 陆明泉, 韩春好. GNSS互操作若干问题. *测绘学报*, 2016, 45: 253–259]
- 2 Lu J, Yang Q W. Study on GNSS interoperability (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2010, 40: 534–540 [卢鋈, 杨强文. GNSS互操作研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2010, 40: 534–540]
- 3 Caporali A, Nicolini L. Interoperability of the GNSS's for positioning and timing. In: *New Advanced GNSS and 3D Spatial Techniques*. Cham: Springer, 2018. 73–85
- 4 Li J, Li Z, Hao J, et al. A preliminary study on compatibility and interoperability of GNSS. *J Geomatics Sci Tech*, 2009, 26: 177–181
- 5 O'Driscoll C, Rao M, Borio D, et al. Compatibility analysis between light squared signals and L1/E1 GNSS reception. In: *IEEE/ION Position Location & Navigation Symposium*. New York: IEEE, 2012
- 6 Lu J. Views on Compatibility and Interoperability of BeiDou Navigation Satellite System. Technical Report. The 4th Meeting of International Committee on GNSS, Petersburg, 2009
- 7 Wang W, Lv C C, Li X. Assessment models and rules of GNSS interoperability. *AMR*, 2013, 846-847: 808–811
- 8 Zhang L. GNSS interoperability: Future or fantasy. *Publ Understand Sci*, 2004, 23: 170–188
- 9 Sahnoudi M, Issler J, Perozans F, et al. A universal multi-SBAS standard to ensure compatibility, interoperability and interchangeability. In: *Satellite Navigation Technologies & European Workshop on GNSS Signals & Signal Processing*. New York: IEEE, 2010. 1–18
- 10 Kubo N, Tokura H, Pullen S. Mixed GPS-BeiDou RTK with inter-systems bias estimation aided by CSAC. *GPS Solut*, 2018, 22: 5
- 11 Han T, Lu X, Du J, et al. Analysis of GNSS user/industry interoperability viewpoint survey results. In: *China Satellite Navigation Conference*. Singapore: Springer, 2017
- 12 Lu J, Yang Q W. International wireless operation and GNSS spectrum compatibility analysis in band 960 MHz to 1610 MHz (in Chinese). *Geomatics Inf Sci Wuhan Univ*, 2011, 36: 1172–1176 [卢鋈, 杨强文. 960 MHz至1610 MHz频段全球业务及GNSS频谱兼容分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2011, 36: 1172–1176]
- 13 Hu Z Q, He X F, Liu Z P, et al. Analysis of the DOP values and availability of combined GPS/GLONASS/GALILEO navigation system (in Chinese). *GNSS World China*, 2012, 37: 32–37 [胡自全, 何秀凤, 刘志平, 等. GPS/GLONASS/GALILEO组合导航DOP值及可用性分析. *全球定位系统*, 2012, 37: 32–37]
- 14 Gao W G, Su M D, Li J Z, et al. A performance evaluation of BeiDou navigation satellite system (in Chinese). *Geomatics Inf Sci Wuhan Univ*, 2012, 37: 1352–1355 [高为广, 苏牡丹, 李军正, 等. 北斗卫星导航系统试运行服务性能评估. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012, 37: 1352–1355]
- 15 Liu Z, Tang J, Wen R, et al. Interoperability and compatibility analysis for GNSS L1/B1/E1 open signals. In: *Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting*. Honolulu, 2013
- 16 Guang W. Research on Key Technologies of GNSS Time Interoperability (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019 [广伟. GNSS时间互操作关键技术研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2019]
- 17 Zhang L F, He H B, Li L, et al. Characteristic analysis and comparison of BeiDou B1C signal (in Chinese). *Modern Navigat*, 2018, 9: 5–13 [章林锋, 何海波, 李琳, 等. 北斗B1C信号及导航电文的特点分析与比较. *现代导航*, 2018, 9: 5–13]
- 18 Han T, Yang Y, Huang G, et al. Fractal behavior of GNSS time offsets and fractal interpolation forecasting method for multi-GNSS time synchronization. *GPS Solut*, 2018, 22: 97
- 19 Kosheliaevskii N B. Thinking on GNSS system time scale and interoperability. In: *Precise Time & Time Interval Systems & Applications Meeting*. 2019
- 20 Wu Y W. Key technologies of GNSS time scale (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2017, 46: 533 [伍贻威. GNSS时间基准关键技术研究. *测*

绘学报, 2017, 46: 533]

- 21 Yuan H B, Zhang J H, Guang W. The study on different methods of time offsets monitoring of GNSS (in Chinese). In: The 9th China Satellite Navigation Academic Annual Meeting. Harbin, 2018 [袁海波, 张继海, 广伟. 不同GNSS时差监测方法研究. 见: 第九届中国卫星导航学术年会. 哈尔滨, 2018]
- 22 Han T, Ji Y Q, Wu J, et al. Necessity of GNSS coordinate interoperability and IGMA based computing method for coordinate transformation parameter (in Chinese). In: The 9th China Satellite Navigation Academic Annual Meeting. Harbin, 2018 [韩涛, 冀永强, 吴静, 等. GNSS坐标系系统互操作的必要性及基于IGMA的坐标转换参数计算方法. 见: 第九届中国卫星导航学术年会. 哈尔滨, 2018]
- 23 Pan L, Zhang X, Li X, et al. Satellite availability and point positioning accuracy evaluation on a global scale for integration of GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo. *Adv Space Res*, 2019, 63: 2696–2710

Analysis of the Beidou navigation satellite system: Interoperability and performance

LU Jun¹, SU ChenGeng^{1*}, HU Min², TANG ZuPing³, YUAN HaiBo^{4,5},
XU JunYi⁶ & SHEN JianHua⁷

¹ Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;

² College of Aerospace Command, University of Aerospace Engineering, Beijing 101416, China;

³ School of Information and Communication, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

⁴ National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

⁵ School of Photoelectricity, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100040, China;

⁶ Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China;

⁷ State Key Laboratory of Satellite Navigation and Equipment Technology, Shijiazhuang 050031, China

Based on the new trends and requirements introduced by the development of the international navigation satellite systems from the single global positioning system (GPS) era to the multiple global navigation satellite system (GNSS) era, the Beidou-3 navigation satellite system (BDS-3) has been designed to ensure compatibility and interoperability with other GNSS systems based on four features, i.e., constellation, signal, time, and coordinate. In terms of constellation design, the BDS-3 constellation orbit altitude and inclination design consider the constellation complementary requirements with the GPS, GLONASS, and Galileo systems. Thus, the PDOP of GNSS improves by 37.9% on average. BDS has acquired interoperability with respect to the signal structure; therefore, it is in agreement with other systems using a similar frequency and spectrum. Thus, users can simultaneously use the navigation services of each major system without changing the hardware design. In terms of time and coordinate, BDS has realized a reference system that is considerably consistent with the systems used on an international scale, resulting in a time difference offset of 50 ns with international UTC and GLNT, which is consistent with the international ITRF 2014 coordinate parameter accuracy. Thus, BDS-3 has achieved interoperability with other GNSSs based on the four aforementioned aspects and can provide better service to global users in combination with other GNSSs.

BDS, interoperability, constellation, signal, time, coordinate

PACS: 84.40.Ua, 89.70.+c, 87.16.Xa, 43.60.Gk, 07.05.Kf

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0243](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0243)