

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 风云三号 D 星天基 BDS 实时定位性能分析
作者: 吴春俊, 孙越强, 王先毅, 白伟华, 孟祥广, 杜起飞
DOI: 10.13203/j.whugis20200187
收稿日期: 2020-04-23
网络首发日期: 2021-02-22
引用格式: 吴春俊, 孙越强, 王先毅, 白伟华, 孟祥广, 杜起飞. 风云三号 D 星天基 BDS 实时定位性能分析. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20200187>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20200187

引用格式:

吴春俊, 孙越强, 王先毅, 等. 风云三号D星天基BDS实时定位性能分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200187 (WU Chunjun, SUN Yueqiang, WANG Xianyi, et al. Assessment of Position Performance of BDS for Space Application Based on FY-3D Satellite[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200187)

风云三号D星天基BDS实时定位性能分析

吴春俊^{1,2,3,4,5} 孙越强^{1,2,3,4,5} 王先毅^{1,3,4,5} 白伟华^{1,2,3,4,5} 孟祥广^{1,3,4,5} 杜起飞^{1,3,4,5}

1 中国科学院国家空间科学中心, 北京, 100190

2 中国科学院大学, 北京, 100049

3 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京, 100190

4 中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京, 100190

5 掩星探测与大气气候应用国际联合实验室, 北京, 100190

摘要: 随着北斗三号卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System-3, BDS-3)开始向全球提供导航服务, 独立使用BDS为在轨运行的卫星提供全球覆盖、全时段的定位服务成为可能。本文结合风云三号D星(FengYun-3D, FY-3D)全球卫星导航系统掩星探测仪(Global Navigation satellite system Occultation Sounder, GNOS)的真实在轨数据对天基BDS的定位性能进行了详细的分析。首先使用BDS真实广播星历计算了在不同轨道高度下的可见卫星数和定位精度因子(Position Dilution of Precision, PDOP), 并结合精密星历分析了广播星历的轨道误差、时钟误差及空间信号测距误差(Signal-In-Space Range Error, SISRE)。仿真结果表明, 在95%的置信水平下, 从地面到2000Km的轨道高度BDS在全球范围内最小可见卫星数为6, 最大PDOP小于5, 星座可用性已经达到100%, 全球平均可见卫星数BDS比GPS高50%以上; BDS广播星历的轨道误差为1.5m, 时钟误差为2.4ns, SISRE达到了0.79m, BDS-3的卫星时钟精度已达到GPS相当的水平。然后使用GNOS在轨数据测试了BDS的可见卫星数、信号强度、伪距测量精度、定位精度等, 重点对BDS-2卫星的码偏移进行了详细的分析。在轨数据分析表明, 只使用BDS-2信号时在服务区域内可实现100%的定位, 三维定位精度为5.53米; 确认了北斗地球同步轨道、倾斜地球同步轨道、中地球轨道卫星均存在随仰角变化的码偏移, 其中北斗地球同步轨道卫星在仰角低于40°时的码偏移是首次直接测量得到; 使用BDS双频测量数据获得了836千米轨道高度以上顶部电离层的全球相对分布, 电离层对伪距的相对延时在0.6m左右。本文的研究对于BDS的天基应用有重要意义, 为天基BDS接收机的设计奠定基础。

关键词: 北斗卫星导航系统; 天基接收机; 定位性能; 全球卫星导航系统掩星探测仪; 风云三号D星

中图分类号: V448, TN967.1

文献标识码: A

天基定位是北斗卫星导航系统(BeiDou Satellite Navigation System, BDS)的一个重要应用领域, 与地面应用不同, 天基定位对BDS服务的全球性提出了更高的要求^{[1][2][3]}。在不同的轨道高度、全球不同的位置, 受可见卫星数和卫星几何分布的影响, 接收机的定位精度都会有所不同。目前, BDS

在轨提供服务的卫星数已经超过美国的GPS和俄罗斯的GLONASS, 是全球在轨卫星数最多卫星导航系统。但BDS采用的是地球同步轨道(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)、倾斜地球同步轨道(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)、中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)相结合的

收稿日期: 2020-04-23

资助项目: 国家自然科学基金(41505030、41606206和41775034); 中国科学院空间先导专项(XDA15007501); 中国科学院科研装备研制项目(YZ201129); 国家重点研发计划(2017YFB0502800, 2017YFB0502802)。

第一作者: 吴春俊, 工程师, 主要从事GNSS定位和遥感的仪器研发。wuchunjun@nssc.ac.cn

通讯作者: 白伟华, 研究员。bjbwh@163.com

星座布局,与全球服务息息相关的 MEO 卫星数少于 GPS,导致部分地区可见卫星数可能少于 GPS;同时,BDS 的建设受地面测控站不能全球布设的限制,在中国以外区域无法对北斗卫星进行直接的监测,广播电文的精度可能差于 GPS^{[4][5][6]}。针对种种顾虑,根据当前 BDS 运行的真实数据定量分析天基 BDS 在全球范围内不同轨道高度下的定位性能可以为相关用户提供指导作用。

对于 BDS 在天基应用中的定位性能,文献[7]使用“灵巧”通信实验卫星上搭载的商用单频接收机接收的数据初步分析了 BDS-2 的定位精度,在接收机存在软件问题的情况下,服务区域内单点定位(Single Point Position, SPP)三维精度为 13m,与 GPS 1m 的精度还有差距。文献[8]-[10]使用风云三号 C 星(FengYun-3C, FY-3C)上 GNSS 掩星探测仪(GNSS Occultation Sounder, GNOS)的数据对 BDS 的定位性能进行了分析,受跟踪通道数的限制,实时三维定位精度为 22m,如果使用北斗精密星历,则定位精度可以达到 4m;使用在轨数据确认了存在于 BDS-2 IGS0 和 MEO 卫星上随仰角变化的码偏移在 BDS-2 GEO 卫星上同样存在;但是当仰角小于 40 度时,IGSO 和 MEO 卫星的码偏移并不明显,与地面测试的结果有较大差异。文献[11]-[13]对 BDS-3 验证系统的信号质量与 BDS-2 进行了对比,发现在 BDS-2 上存在的由卫星引起的码偏移在 BDS-3 验证系统上已经大大减小,BDS-3 的码偏移已达到与 GPS 相当的水平。并根据 BDS-3 的设计星座仿真了在地面应用中卫星的可用性,在全球范围内可见卫星数为 6-13,PDOP 最小可以达到 1.3,最大为 2.7。

风云三号 D 星(FengYun-3D, FY-3D)星 GNOS 是我国首个在轨业务运行的地球大气掩星探测仪,其利用地球大气对 GNSS 信号的折射作用反演地球大气的温、湿、压和电离层廓线信息^{[14][15]}。FY-3D 星是我国第二代极轨气象卫星的第四颗星^[16],于 2017 年 11 月 15 日发射升空,轨道高度 836 千米,轨道倾角 98.75 度,运行周期约一百分钟。FY-3D 星 GNOS 在 FY-3C 星 GNOS 的基础上进行了多项技术的优化改进^[17],在轨运行以

来,GNOS 各项指标达到国际领先水平^[16]。GNOS 可以接收 BDS 和 GPS 的信号,并进行实时定位,设计有 6 个北斗 B1I/B2I 双频定位通道和 9 个 L1CA/L2C/L2P GPS 三频定位通道,可以捕获跟踪 PRN 1-14 的北斗卫星及所有 GPS 卫星,其在轨接收的数据在本文中被用来分析天基 BDS 的定位性能。

本文从用户的角度分析当前 BDS 在天基定位领域的服务性能,主要有以下几个部分:首先使用 BDS 广播星历仿真了在不同轨道高度下、全球不同位置的可见卫星数和定位精度因子(Position Dilution of Precision, PDOP),并结合北斗精密星历分析了广播星历的轨道误差、时钟误差及空间信号测距误差(Signal-In-Space Range Error, SISRE),对相同时段 GPS 的性能也进行了对比分析。然后使用 GNOS 在轨数据测试了 BDS 的可见卫星数、信号强度、伪距测量精度、定位精度等,重点对 BDS-2 卫星的码偏移进行了详细的分析,并使用 BDS 双频测量数据计算了顶部电离层的全球分布。最后一节对全文进行了小结。

1 天基 BDS 定位误差分析

影响 BDS 实时定位精度的因素有可见卫星数和卫星分布(统称卫星可用性)、广播星历的轨道误差和钟差、地球大气延时、接收机测量误差等。在工程应用中,用户定位误差可表示为

$$UNE = PDOP \cdot \sqrt{SISRE^2 + UEE^2} \quad (1)$$

式中,UNE: User Navigation Error, 用户定位误差;PDOP: Position Dilution of Precision, 定位精度因子;SISRE: Signal-In-Space Range Error, 信号空间距离误差;UEE: User Equipment Error, 用户设备误差。

由式(1)可以看出,天基 BDS 定位误差由 PDOP、SISRE 和 UEE 三项影响因素共同决定。

分析 PDOP 和 SISRE 时使用的广播星历从中国卫星导航系统管理办公室测试评估研究中心网站上下载。分析广播星历的轨道误差和时钟误差时使用武汉大学国际 GNSS

服务 (International GNSS Service, IGS) 中心发布的精密星历作为参考, 该精密星历精度在 10cm 左右^[18], 可以作为评估广播星历的标准。

1.1 PDOP

PDOP 反映了用户测距误差 (User Range Error, URE) 和用户定位误差之间的关系。假设用户定位误差为 $[\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{\delta t}]^T$, 用户测距误差为 $\varepsilon_\rho = [-\varepsilon_\rho^1 \ -\varepsilon_\rho^2 \ \dots \ -\varepsilon_\rho^N]^T$, N 为观测值的个数, 则根据最小二乘原理, 得

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{\delta t} \end{bmatrix} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \varepsilon_\rho$$

矩阵 \mathbf{G} 为观测几何矩阵, 权系数矩阵

$$\mathbf{H} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1}, \text{ 用户三维定位误差} \\ \sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} = \sqrt{h_{11} + h_{22} + h_{33}} = PDOP \cdot \sigma_{URE}^2 \quad (2)$$

定位精度因子 (PDOP) 为

$$PDOP = \sqrt{h_{11} + h_{22} + h_{33}}$$

从式 (2) 可以看出, PDOP 越小, 相同的 URE 对应的 σ_p 越小。导航卫星的可见卫星数和卫星分布决定了 PDOP 的大小。

1.1.1 BDS 星座状态

当前 BDS 和 GPS 星座的状态如表 1 所示。BDS-3 星座中与全球定位密切相关的 24 颗 MEO 卫星已于 2020 年 2 月 25 日全部开始向全球提供服务, BDS-3 系统也于 2020 年 7 月 31 日正式宣布运行。本文没有特殊说明时 BDS 包含了 BDS-2 和 BDS-3。

表 1 BDS 和 GPS 星座设计和建设情况

Table 1 Design and Construction of BDS and GPS

	设计星座	已运行	完成时间
BDS-2	5 GEO	5 MEO	2012 年 12 月
	5 IGSO	7 IGSO	
	4 MEO	3 MEO	
BDS-3	3 GEO	2 GEO	2020 年 7 月
	3 IGSO	3 IGSO	
	24 MEO	24 MEO	
GPS	24 MEO	31 MEO	1994 年 3 月

1.1.2 可见卫星数和 PDOP

由于 GNSS 服务空域通常为地球表面到地表以上 1000km-3000km 的空间区域^[19], 而在轨运行的卫星约三分之二是轨道高度低于 2000km 的低轨卫星, 所以本文重点对基于 BDS 的低轨卫星的定位性能进行分析。使用 GNSS 信号给中高轨卫星提供定位服务需要对接收机的硬件和软件进行重新设计^[20], 目前尚处于研究试验阶段, 不在本文的讨论范围。

使用 2020 年 3 月 1 日至 3 月 7 日共七天的广播星历, 计算在全球范围内、不同轨道高度上单 BDS-2、BDS-2/BDS-3、单 GPS、BDS-2/BDS-3/GPS 组合定位四种模式下可见卫星数, 如表 2 所示。表中分别统计了可见卫星的最小、最大和平均值。仰角阈值设为 5 度, 位置分辨率为经度 2° 和纬度 2°, 采样间隔为 300 秒。为了与在轨定位真实情况保持一致, 星历中由于各种原因不健康的卫星的未参与统计。分析的轨道高度分别为 300km, 800km 和 2000km, 对应不同类型的低轨卫星运行的轨道。作为对比, 最后一组是地球表面高度 0km 处的可见卫星数。PDOP 的变化范围如表 3 所示。从表 2 和表 3 可以看出, 随着轨道高度的升高, 可见卫星数逐渐减小, PDOP 依次增大。由于 BDS-2 是个区域导航系统, 尚不具备全球服务的能力, 在服务区域内, 可见卫星 5 到 15 颗, PDOP 的范围为 1.12 至 7.78。使用包括 BDS-2 和 BDS-3 在内的所有 BDS 在轨卫星, 可见卫星数为最小为 4 颗, 这也意味着在全球范围内的任意一点, 从地球表面到 2000km 的轨道高度均能实现定位; PDOP 的范围为 0.79-27.14。单独使用 GPS 时, 可见卫星数为 6-16, PDOP 为 1.05-7.96。不同轨道高度下, 平均可见卫星数 BDS 均明显高于 GPS。最后统计了 BDS/GPS 组合定位模式下的可见卫星数和 PDOP。在组合定位模式下最大可见卫星数可达 43 颗, PDOP 最小可以降低到 0.65。

在 95% 的置信水平下可见卫星数和 PDOP 的统计值对接收机的长期定位同样有重要的意义。以 800km 高度轨道为例, 对上述时段内可见卫星数和 PDOP 的数据分布进行统

计分析,如图 1 和图 2 所示。从图中可以看出,BDS-2 主要向亚太及周边地区提供服务,BDS-3 建设完成以后,全球任意地方在大于 95%的时间里可见卫星数大于或等 6 颗星,PDOP 小于 5,即星座可用性已经达到 100%^[11]。

当前天基 GNSS 接收机通常都具有 GPS 定位的功能,兼容 BDS 和 GPS 的组合定位将是普遍存在的定位模式。图 3 分析了 BDS/GPS 组合定位相对单 BDS 和单 GPS 可见

卫星数增加的比例。从图 3(a)中可以看出,组合定位增加了 BDS 在美洲及周边地区可见卫星数的数量,可见卫星数在部分地区增加的比例高达 180%。相较于单 GPS,图 3(b)显示了组合定位大大提高了全球特别是亚太地区可见卫星数,这对增加 GNSS 定位的可靠性具有重要的意义,同时对使用 GNSS 信号的科学探测,如 GNSS 掩星探测、GNSS 反射探测等也有直接的影响,相应的探测能力会随着可见卫星数的增加而提高。

表 2 不同轨道高度可见卫星数 (>5°)

Table 2 The number of visible Satellites in different height orbit(>5°)

	300km		800km		2000km		0km	
	min-max	mean	min-max	mean	min-max	mean	min-max	mean
BDS-2*	5-15	11.18	5-15	11.09	5-15	10.87	5-15	11.23
BDS-2/BDS-3	6-29	15.02	6-29	14.69	4-29	13.92	6-30	15.22
GPS	6-15	10.54	5-15	10.26	5-15	9.58	6-16	10.71
BDS-2/BDS-3/GPS	12-42	25.56	12-42	24.95	11-40	23.49	12-43	25.92

* BDS-2 是服务区域内的统计结果

表 3 不同轨道高度 PDOP (>5°)

Table 3 PDOP in Different Height Orbit(>5°)

	300km		800km		2000km		0km	
	min-max	mean	min-max	mean	min-max	mean	min-max	mean
BDS-2*	1.12-7.33	2.35	1.21-7.54	2.39	1.23-7.78	2.52	1.12-7.33	2.32
BDS-2/BDS-3	0.81-3.38	1.47	0.81-6.15	1.53	0.87-27.14	1.66	0.79-3.11	1.44
GPS	1.09-5.09	1.67	1.10-7.88	1.74	1.17-7.96	1.93	1.05-4.64	1.63
BDS-2/BDS-3/GPS	0.66-1.82	1.02	0.68-2.02	1.05	0.71-2.36	1.15	0.65-1.82	1.00

* BDS-2 是服务区域内的统计结果

1.2 BDS 广播星历误差及 SISRE

SISRE 由 BDS 卫星轨道误差、时钟误差、大气传播延时等决定,其中卫星轨道误差和时钟误差与 BDS 卫星的建造水平、测控站的全球分布有很大关系。

使用文献[21][22]的分析方法,利用 2019 年 1 月 1 日到 12 月 31 日共计 365 天的数据对 BDS 广播星历的精度进行分析,得到表 4 所示的结果。表中分别列出了 GEO/IGSO/MEO 三种轨道类型的卫星 R/T/N/3D 的轨道误差、时钟误差和最终计算

得到的 SISRE。卫星类型后面括号中的数据是参与统计的卫星数,表格最后一行是同一时期 GPS 卫星的结果。从表中可以看出: BDS-2 的三维轨道误差为 2.09-3.18m,时钟误差为 2.40-2.68ns, SISRE 的范围是 0.83-1.29m; BDS-3 与 BDS-2 相比,各项指标均有明显的提高, SISRE 的值达到了 0.61m,其中轨道误差 0.59m (3D),在径向的误差仅为 0.11m,时钟误差 1.94ns, SISRE 的大小主要是由时钟误差决定;参与统计 BDS 星座整体的轨道误差为 1.0m,时钟误差 2.39ns, SISRE 的值为 0.79m; BDS-3 的广播

星历精度已经达到了与 GPS 相当的水平。

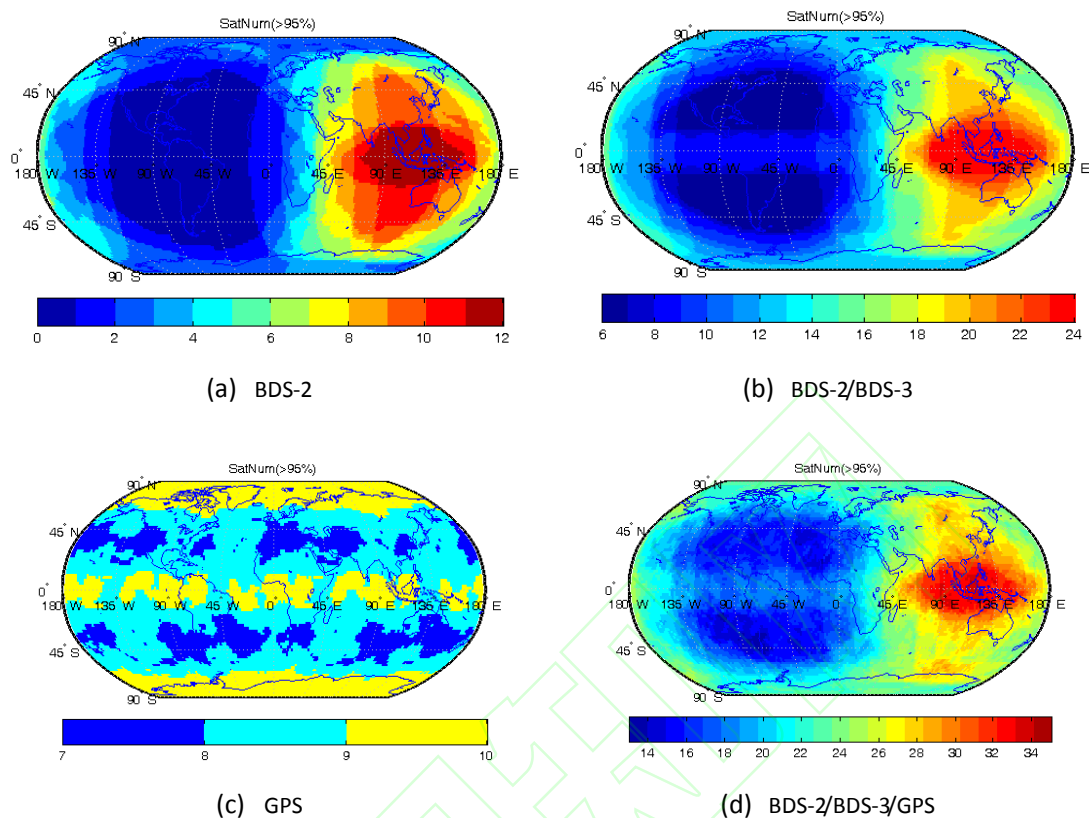


图 1 BDS-2, BDS-2/BDS-3, GPS, BDS-2/BDS-3/GPS 可用卫星数全球分布 (800km)

Fig 1 Number of Visible Satellites in Global Scale for BDS-2,BDS-2/BDS-3,GPS,BDS-2/BDS-3/GPS(800 km)

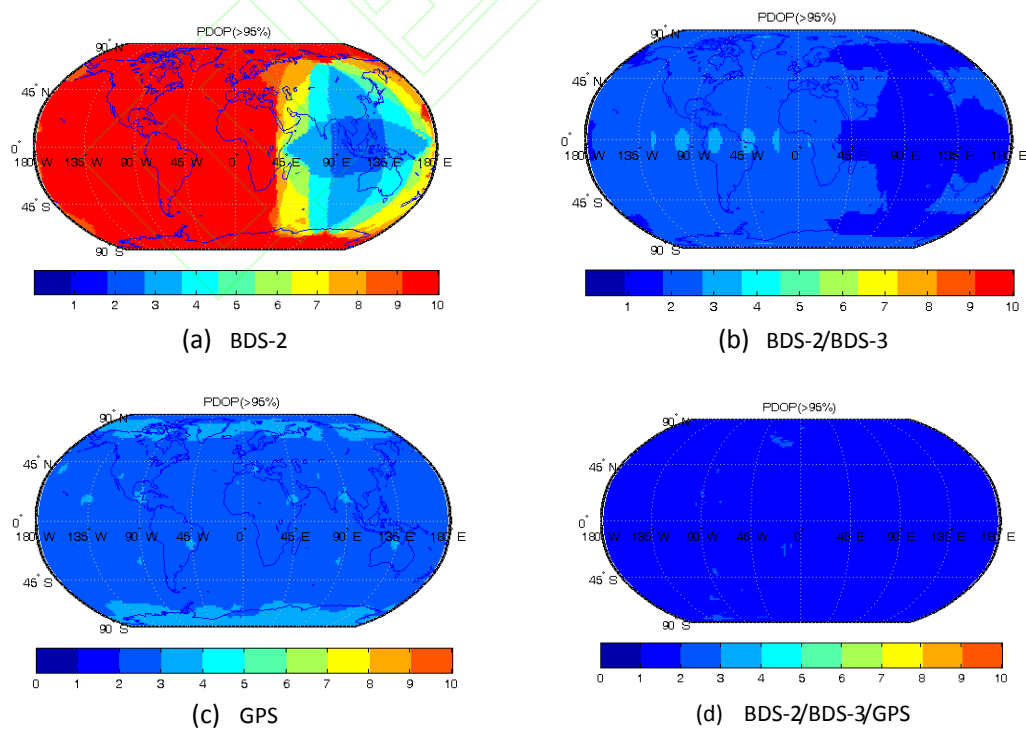


图 2 BDS-2, BDS-2/BDS-3, GPS, BDS-2/BDS-3/GPS PDOP(800 km)

Fig 2 PDOP of BDS-2,BDS-2/BDS-3,GPS,BDS-2/BDS-3/GPS(800 km)

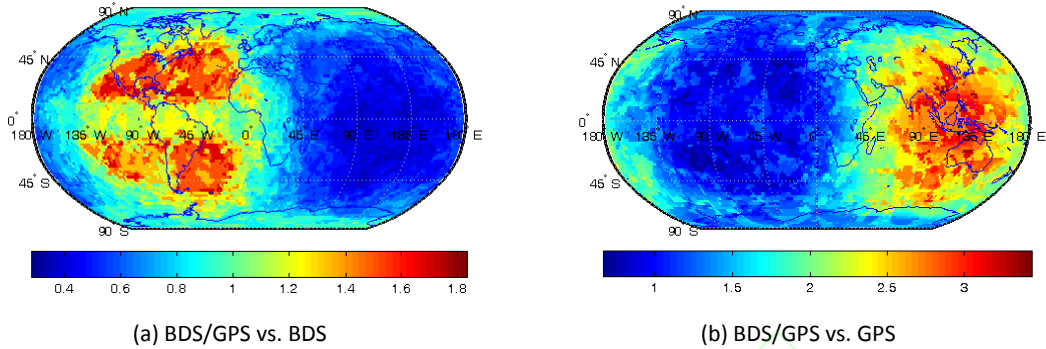


图 3 BDS/GPS 相对于单 BDS 和单 GPS 可用卫星数的提升 (800km)

Fig 3 Improvement of Visible Satellites of Combined BDS/GPS to BDS alone or GPS alone (800km)

表 4 不同类型卫星广播星历误差

Table 4 The Accuracy of Broadcast Ephemeris of Different Style Satellites

类型/误差	R(m)	T(m)	N(m)	3D(m)	ClOCK (ns)	SISRE(m)	
BDS	GEO (5)	0.76	2.71	1.46	3.18	2.43	1.29
	IGSO (7)	0.36	1.53	1.75	2.36	2.40	0.83
	MEO (3)	0.54	1.79	0.92	2.09	2.68	0.94
	MEO (18)	0.11	0.45	0.37	0.59	1.94	0.61
	All (33)	0.30	1.14	0.88	1.50	2.39	0.79
GPS	All (31)	0.16	0.98	0.42	1.08	1.73	0.55

1.3 用户设备误差

用户设备误差则是由BDS接收机的性能决定，主要由接收机的硬件和软件性能决定。硬件设计包括天线设计、时钟稳定度、采样率、射频电路等。软件设计包括滤波器设计、跟踪环路、解算方法、完备性设计等。对于实时定位，通常以伪距作为测量值。以中科院国家空间科学中心研制的GNOS为例，在以GNSS模拟器的信号为输入载噪比为52db的信号强度下，伪距测量精度小于10cm。在实际应用中，受大气折射、多路径等影响，接收机多数测量精度会低于这一水平。

2 FY-3D星GNOS在轨数据分析

使用FY-3D星GNOS在轨数据对BDS的定位性能进行分析主要从跟踪的连续性、信号强度、伪距精度、可见卫星数、PDOP和定

位精度等几个方面进行研究，重点对存在于BDS-2卫星上的伪距码偏移进行详细的分析。最后使用B1I和B2I双频测量信号对影响定位精度的全球电离层分布进行探讨。

由于FY-3D卫星在BDS-3的用户接口控制文件(Interface Control Document, ICD)发布之前发射升空，所以GNOS只能接收BDS-2的信号。中科院国家空间科学中心研制的下一代GNOS(GNOS II型)已经具备了BDS-3信号的接收能力，将随风云三号E星(FengYun-3E, FY-3E)入轨运行。本节只对BDS-2的定位性能进行评估。分析在轨数据时使用的是FY-3D星GNOS从2019年1月1日至6月30日共181天的真实数据。研究BDS定位精度时使用FY-3D星的精密轨道作为参考数据，该精密轨道是根据GNOS中GPS高精度测量值，使用武汉大学研制的PANDA软件计算获得，定轨精度2-3cm，远远高于实时标准定位精度。

2.1 跟踪卫星数

根据 GNOS 接收的在轨数据，绘制了跟踪北斗卫星数的全球分布，如图 4 所示，黑实线包围的区域为官方设计的 BDS-2 的服务区域^[6]，从图上可以看出在中国及周边地区上空跟踪到的卫星数较多，在美洲及周边地区跟踪到的卫星数较少。图 5 是 2019 年 1 月 1 日 24 小时内跟踪到北斗卫星的天空视图，在卫星运行方向方位角为 0° （即 $Az=0^\circ$ ），中心位置对应的仰角为 90° ，实线圆对应的仰角为 0° 。从图上可以看出，对于安装在低轨卫星上的接收机，其跟踪的卫星信号是从运行的前半天往后半天运动，这是由于低轨卫星的轨道周期远远小于 BDS 卫星的轨道周期而速度大于导航卫星的速度导致的；GNOS 的北斗信号跟踪连续、正常。

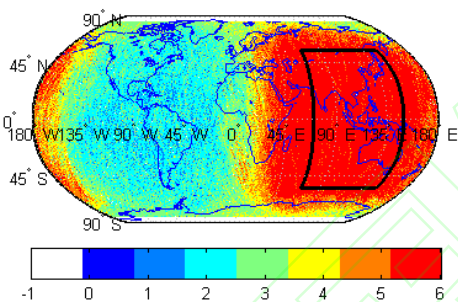


图 4 GNOS 跟踪北斗卫星数全球分布

Fig 4 Number of Tracked BDS Satellites of

GNOS

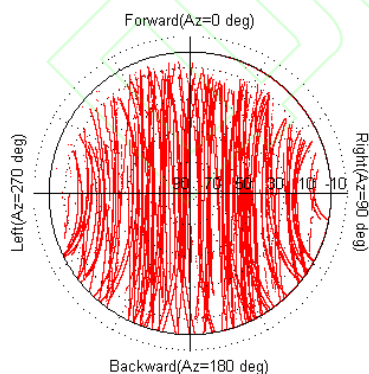


图 5 GNOS 跟踪北斗卫星天空视图

Fig 5 Skyplot of Tracked Satellites of GNOS

2.2 信号强度

对 BDS-2 卫星的信号强度进行统计，如图 6 所示，图中包含了不同类型的北斗卫星

在不同仰角下的载噪比，仰角分辨率设为 10° 。从图上可以看出，随着仰角的增加信号的载噪比逐渐变大；MEO 卫星的信号强度明显高于 GEO 和 IGSO，B2I 的信号强度高于 B1I；MEO 卫星的 B2I 的载噪比比 B1I 高约 5 dB；GEO 和 IGSO 卫星的 B1I 和 B2I 的信号强度基本一致。

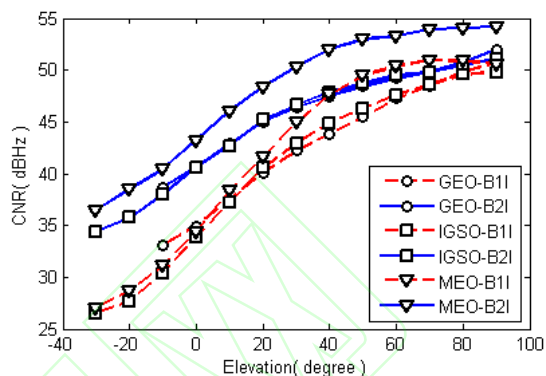


图 6 BDS-2 不同信号载噪比随仰角的变化

Fig 6 CNR Vs. Elevation of BDS-2 Signals

2.3 伪距精度及 BDS-2 卫星码偏移

由于载波相位测量精度通常比伪距精度高 2 个量级，以载波相位为参考，使用文献[23]中的 TEQC 分析方法可以获得 B1I 和 B2I 的伪距精度。图 7 分别以 BDS 2 号星（GEO），7 号星（IGSO）和 12 号星（MEO）为例显示了不同类型卫星的伪距精度，其中第一行第二行分别对应北斗 B1I 和 B2I，其它各卫星具有类似的特点。从图上可以看出，北斗卫星在轨伪距测量误差与仰角有高度的相关性。

文献[24]使用不同型号的地面接收机和天线研究了北斗卫星的伪距误差随仰角的变化特性，表明 BDS-2 的 IGSO 和 MEO 卫星都存在与仰角密切相关的伪距误差，称之为码偏移 (Code Bias)。由于 GEO 卫星相对地面接收机静止不动，无法使用地面接收机测量 GEO 卫星随仰角变化的码偏移。低轨卫星为研究北斗 GEO 卫星的码偏移提供了理想的场景。文献[8][9]使用 FY-3C GNOS 的在轨数据分析了包括 GEO 卫星在内的不同类型卫星的码偏移，但是分析结果显示在仰角小于 40° 时，码偏移没有明显的变化，与地面分析的结果并不一致。

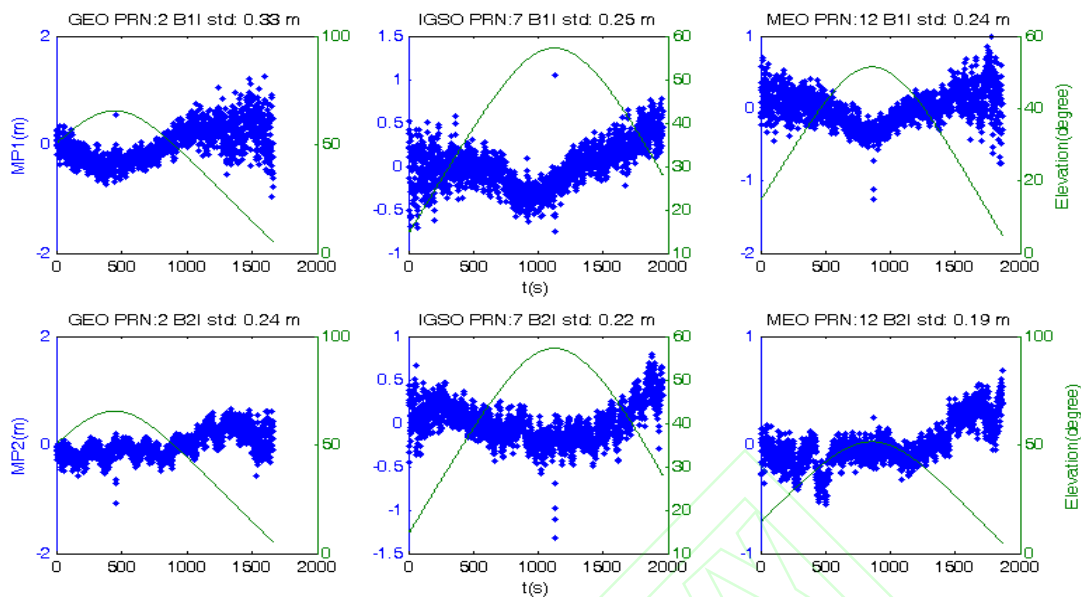


图 7 北斗 GEO/IGSO/MEO 卫星伪距精度

Fig 7 Accuracy of Pseudo-range for GEO/IGSO/MEO of BDS

FY-3D 星的 GNOS 在 FY-3C 星的基础上对多项功能和性能进行了改进^[17]。鉴于北斗 GEO 卫星和 IGSO/MEO 卫星在轨姿态控制有所不同,需要分别分析码偏移。IGSO 和 MEO 卫星运行在动态偏置 (yaw-steering) 模式下,根据文献[25]的估算方法可以算出太阳的位置,并计算出卫星在轨道坐标系下的方位角。GEO 卫星运行在零偏模式 (Normal Mode) 下,卫星本体坐标系和轨道坐标系保持一致。站在北斗卫星的角度,从北斗卫星指向地心的向量俯视角设为 0 度,向外侧俯视角逐渐增加,与卫星本体坐标系固连的 X 方向方位角为 0 度,信号覆盖的方位角范围为 0~360°。使用在轨数据对各种类型的北斗卫星的码偏移进行统计,结果如图 8 所示,分别显示了 GEO/IGSO/MEO 卫星 B1I 和 B2I 信号随俯视角和方位角的变化情况。对于运行在轨道高度 836k

m 的 GNOS,俯视角的最大值为 9.93° (GEO/IGSO) 和 15.03° (MEO)。俯视角和方位角的分辨率设为 0.5°。从图上可以看出,GNOS 的运行轨迹覆盖了最大俯视角范围内的所有点,BDS-2 所有卫星的码偏移随俯视角都有明显的变化,其中 MEO 卫星的码偏移最为明显,GEO/IGSO 卫星的码偏移相对较

小,且 GEO 卫星的码偏移与 IGSO 卫星处于相当的水平。对同一时期 GPS 的码偏移进行分析,如图 9 所示。与图 8 相比,GPS 的 L1C/A 码、L2C 码和 L2P 码的码偏移在不同俯视角下始终保持在 0 附近。由于 GNOS 的 BDS 和 GPS 定位使用的是同一个天线,接收机环境多路径对 BDS 和 GPS 的影响可以认为是相同的,所以可以判断图 8 中的码偏移应该是北斗卫星端的因素造成的。

按北斗卫星的轨道类型和信号频点分析北斗卫星信号的码偏移,如图 10 所示,分别显示了 PRN 1~14 共 14 颗北斗卫星 B1I/B2I 两个频点的码偏移,其中 IGSO/MEO 卫星的码偏移与地面分析的结果较吻合^[24],GEO 卫星的码偏移则是首次由在轨卫星直接测量得到。与 FY-3C GNOS 在轨测量的结果不同^[9],在仰角低于 40 度时,北斗卫星的码偏移随仰角仍表现出较为明显的线性变化,这可能是由于 FY-3D GNOS 增加了定位天线的增益,加强了抗多径设计的结果。针对北斗 GEO 卫星,在高仰角时五颗卫星的码偏移表现出较大的不同,在 B1I 频点表现的尤为明显,其中 C05 的码偏移明显大于其它四颗星,C01 的码偏移最小。对不同类型的 BDS 和 GPS 卫星的码偏移随仰角的变化进行

统计，如图 11 所示。从图 11 (a) 可以看出，

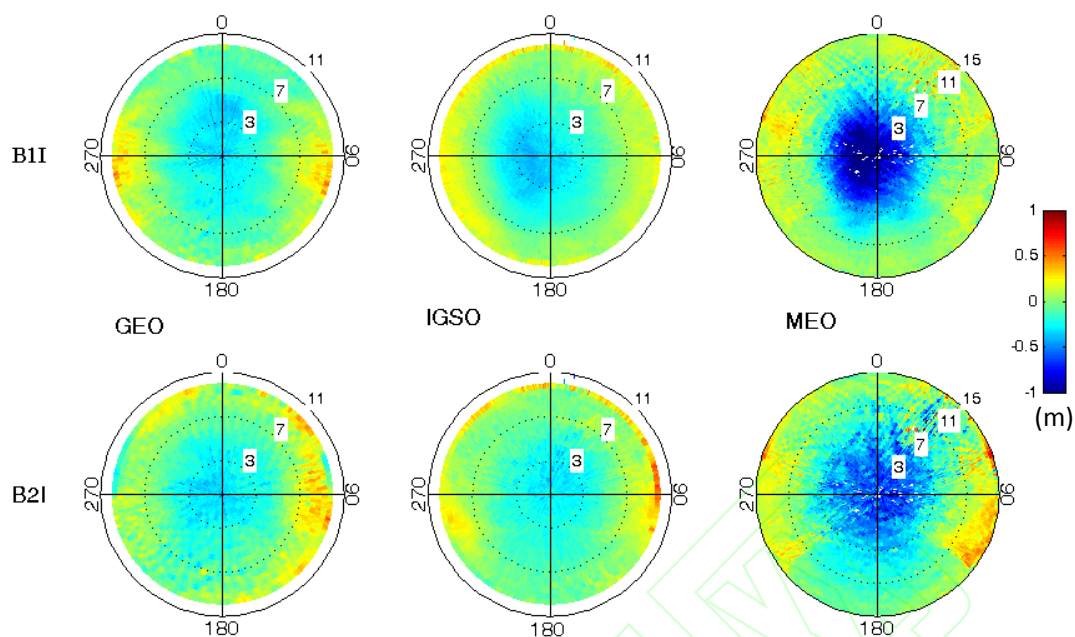


图 8 BDS-2 卫星码偏移随俯视角和方位角的变化
Fig 8 BDS-2 Code Bias Vs. Nadir and Azimuth Angles

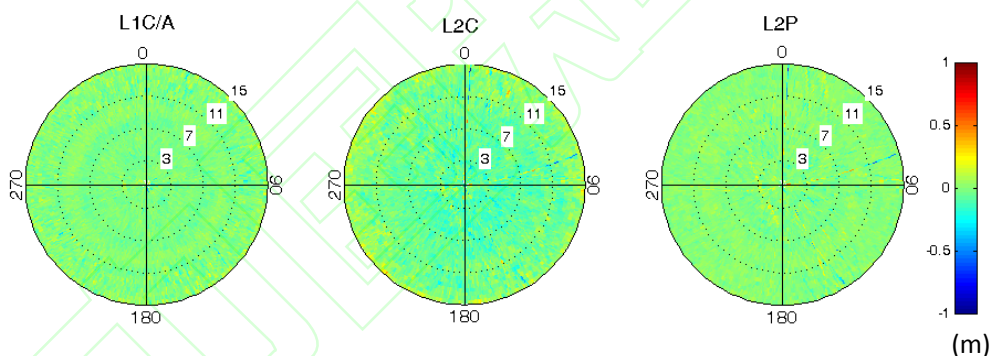


图 9 GPS 卫星码偏移随俯视角和方位角的变化
Fig 9 GPS Code Bias Vs. Nadir and Azimuth Angles

BDS 各种轨道类型 B1I 和 B2I 信号都存在明显的码偏移，且随着仰角变化而依次变化；MEO 卫星的码偏移大于 GEO 和 IGSO，最大偏移可以达到 1m；对于 MEO 卫星，B1I 的码偏移大于 B2I；GEO 和 IGSO 卫星的码偏移相对 MEO 较小，且 GEO 和 IGSO 卫星的码偏移变现出类似的特点。图 11 (b) 显示了 GPS L1C/A、L2C、L2P 的码偏移随仰角的变化，在仰角大于 10° 时，GPS 信号的码偏移都在 0.1m 以内。

2.4 BDS-2 定位精度和 PDOP

对北斗定位精度的分析，依据北斗服务性能规范^[6]，选择在 55° S~55° N，70° E~150° E 以内的区域进行研究。图 12 和图 13 以 2019 年 1 月 1 日 GNOS 在轨接收的数据为例显示了定位性能和跟踪到的卫星数，其中图 12 中被虚线圈起的点是运行到北斗服务区域内的点，从图上可以看出在亚太地区 GNOS 全部可以实现定位。对长达半年的数据进行统计，如图 14 所示，89.8% 的点可以跟踪到 6 颗北斗卫星，99.8% 的点可以跟踪到 5 颗或者以上的卫星。在服务区域内，所有的点均可实现定位，定位精度的三维均方根误

差为 5.53m，优于北斗二号水平和垂直定位精度优于 10m（置信度 95%）的设计指标。

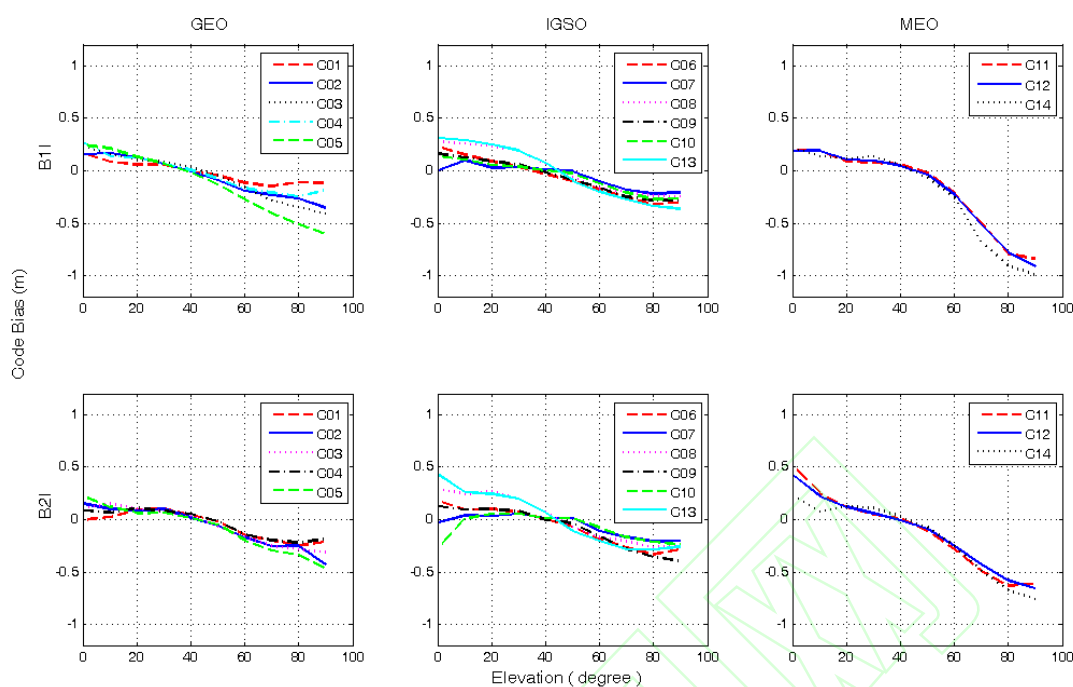


图 10 不同类型 BDS 卫星的码偏移随仰角的变化
Fig 10 Code Bias of Different BDS Satellites

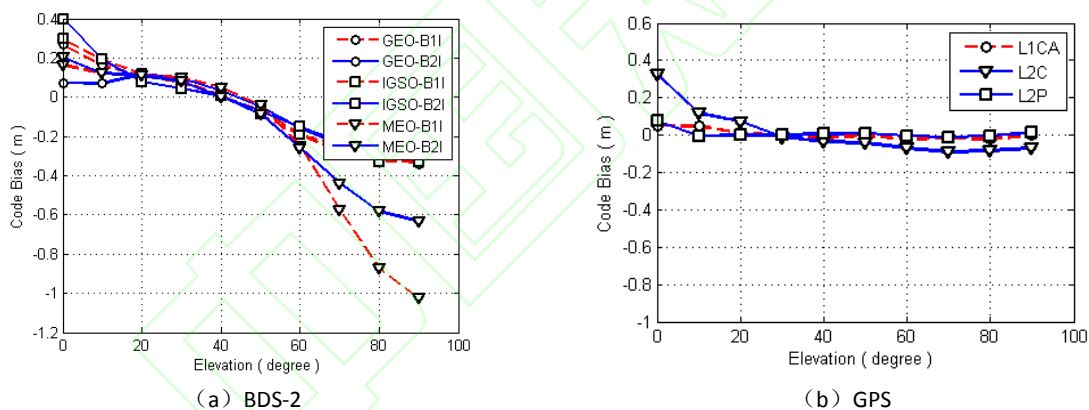


图 11 BDS 和 GPS 的码偏移随仰角的变化
Fig 11 Code Bias Vs. Elevation of BDS and GPS

与文献[7][10]中 FY-3C 星 GNOS 定位结果相比, FY-3D 星 GNOS 的定位精度有了明显的提升。

2.5 地球电离层对天基定位的影响

天基 BDS 在轨定位的性能除了受可见卫星数、PDOP、广播星历的精度及接收机测量精度影响之外, 与地球电离层延时也有关系。地球电离层高度约 60~1000km, 其中密度最大的区域在 200~300km 处。FY-3D 星运

行的轨道高度在电离层顶的位置, GNOS 双频

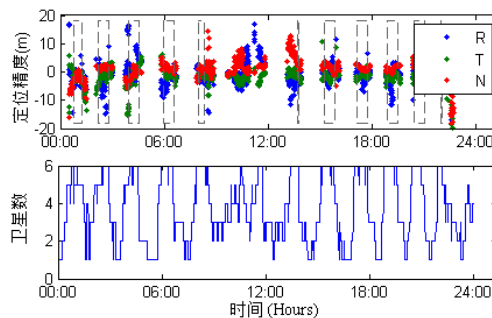


图 12 在轨定位精度及跟踪卫星数

Fig 12 Position Accuracy and Tracked Satellites

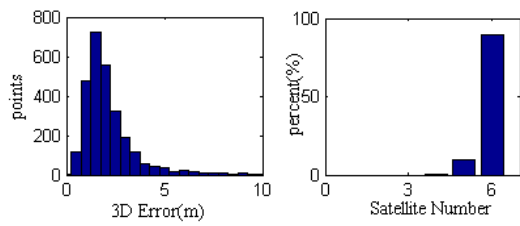


图 13 定位精度和参与定位卫星数统计

Fig 13 Statistics of Position Accuracy and Tracked Satellites

北斗观测数据可以用于分析电离层对天基定位的影响。近些年使用天基 GNSS 定位信号研究顶部电离层的结构是 GNSS 科学探测的一个新的方向^{[26][27][28]}。

利用 GNOS 的 BDS 双频载波相位测量数据,反演 836km 以上高度区域地球电离层的全球相对分布,如图 15 所示,图中黑实线是地球磁赤道。图 15 (a) (b) 分别对应白天 (12:00-15:00 Local Time) 和夜间 (0:00-3:00, Local Time) 两个时间段的电子含量相对分布,其中 1TECU = 10^{16}

electron/ m^2 , 1TECU 对应的伪距延时约 16cm。从图 15 (a) 可以看出顶部电离层的电子密度与地球磁赤道保持高度一致,且在地球磁赤道附近电子含量明显高于远离赤道的区域;与图 15 (a) 相比,图 15 (b) 夜间的电子含量明显降低,且向赤道两边分散,分析结果与文献[29]的仿真结果及 DMSP 卫星的就位探测的结果^{[30][31]}一致。对于轨道高度在 836km 的低轨卫星,电子含量的相对变化大约有 4TECU。对于单频 BDS 接收机,由电离层延时引起的伪距相对延时约为 0.6m。

3 结论

针对天基 BDS 定位,本文首先对影响定位性能的可见卫星数、PDOP、SISRE 及接收机误差等各种因素进行了理论和仿真分析,结果表明:从地面到 2000 千米高度的卫星

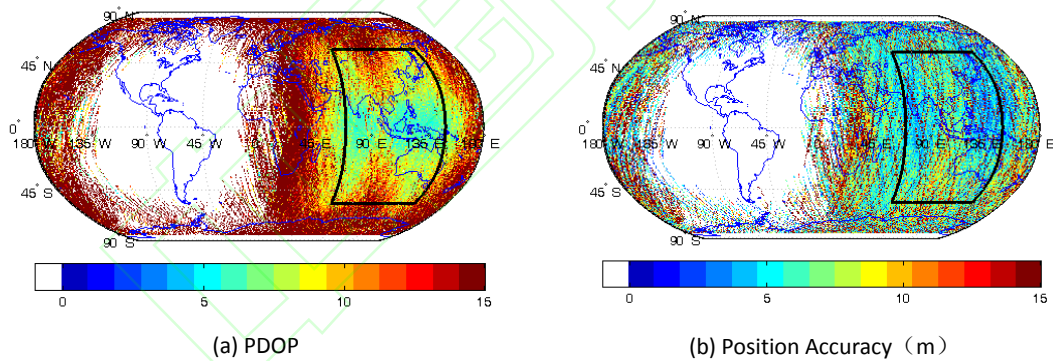
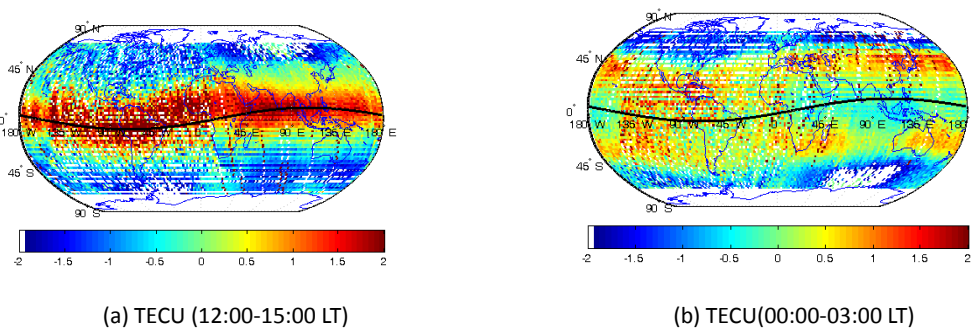


图 14 BDS-2 PDOP 和定位精度的全球分布

Fig 14 Distribution of BDS-2 PDOP and Position Accuracy



(a) TECU (12:00-15:00 LT)

(b) TECU(00:00-03:00 LT)

图 15 基于 FY-3D 星 BDS 在轨数据的顶部电离层电子相对含量全球分布图 (>836Km)

Fig 15 Distribution of Global TECU based on FY-3D BDS Data (>836Km)

轨道, BDS 已经具备全时段全球覆盖的定位能力; 在 95% 的置信水平下, 最小可见卫星数为 6, 最大 PDOP 小于 5, 星座可用性已经达到 100%; 使用 BDS/GPS 组合定位较单 BDS 和单 GPS 平均可见卫星数分别增加了约 70% 和 150%。使用 BDS 广播星历与精密星历对比发现, 当前 BDS 广播星历轨道三维误差为 1.5m, 时钟误差为 2.4ns, SISRE 达到了 0.79m。与 GPS 的结果进行对比分析表明 BDS-3 的卫星时钟精度已达到与 GPS 相当的水平。得益于 BDS-3 采用了星间链路等新技术, BDS-3 较 BDS-2 的广播轨道精度有了明显的提高。使用 FY-3D 星 GNOS 数据验证了 BDS-2 的在轨定位性能, 包括跟踪卫星数、信号强度、伪距测量精度、定位精度等。重点对存在于 BDS-2 卫星的码偏移进行了详细的分析, 首次直接确认了北斗 GEO 卫星存在与 IGS0/MEO 卫星类似的码偏移问题, 五颗 BDS-2 GEO 卫星的码偏移的平均值与 IGS0 卫星相当, 但不同 GEO 卫星的码偏移表现出较大特殊性, 北斗 C05 的码偏移在高仰角时可以达到 0.6m。在 BDS-2 的服务区域内三维定位精度为 5.53m, 并得到了 836Km 轨道高度以上顶部全球电离层的相对分布, 电离层电子密度相对分布不均对伪距测量的影响在 0.6m 左右。对包括 BDS-3 在内的所有北斗卫星的在轨定位性能将利用 FY-3E 星 GNOS II 型进行测试, 测试结果将在后续的文章中进行介绍。

参 考 文 献

- [1] Birmingham W P, Miller B L, Stein W L. Experimental Results of Using the GPS for Landsat 4 onboard Navigation [J]. *Navigation*, 1983, 30(3):244-251
- [2] Bauer F H, Kate H, Lightsey E G. Spaceborne GPS Current Status and Future Visions[C]. 1998 *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 1998,3
- [3] Montenbruck O, Markgraf M, Garcia-Fernandez M, et al. GPS for Microsatellites – Status and Perspectives [M]. *Small Satellites for Earth Observation*, 2007:165-174
- [4] Li Liu, Zhang Tianqiao, Zhou Shanshi, et al. Improved design of control segment in BDS - 3[J]. *Navigation*, 2019, 66(1):37-47
- [5] Yang Yuanxi, Gao Weiguang, Guo Shuren, et al. Introduction to BeiDou - 3 navigation satellite system [J]. *Navigation*, 2019, 66(1):7-18
- [6] China Satellite Navigation Office. China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (Version 1.0) [S]. Beijing: Dec.2013
- [7] Chen Xi, Zhao Sihao, Wang Menglu, et al. Space-borne BDS Receiver for LING QIAO Satellite: Design, Implementation and Preliminary In-orbit Experiment Results [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(10):837-847
- [8] Wang Fuhong, Ling Sanli, Gong Xuewen, et al. Decimeter - Level Orbit Determination for FY3C Satellite Based on Space - Borne GPS/BDS Measurements[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1):1-6(王甫红,凌三力,龚学文,等. 风云三号 C 卫星星载 GPS/BDS 分米级实时定轨模型研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版* 2020,45(1):1-6)
- [9] Jiang Kecai, Li Min, Zhao Qile, et al. BeiDou Geostationary Satellite Code Bias Modeling Using Fengyun-3C Onboard Measurements [J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 2460
- [10] Xiong Chao, Lu Chuanfang, Zhu Jun, et al. Orbit Determination using Real Tracking Data from FY3C-GNOS [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60 (3):543-556
- [11] Yang Yuanxi, Xu Yangyin, Li Jinlong, et al. Progress and Performance Evaluation of BeiDou Global Navigation Satellite System: Data Analysis Based on BDS-3 Demonstration System[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018,61(3): 614-624
- [12] Zhang Zhiteng, Li Bofeng, Nie Liangwei, et al. Initial Assessment of BeiDou-3 Global

- Navigation Satellite System: Signal Quality, RTK and PPP [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23:111
- [13] Lei W Y, Wu G C, Tao X X, et al. BDS Satellite-induced Code Multipath: Mitigation and Assessment in New-generation IOV Satellites[J]. *Advances in Space Research*, 2017,60(12): 2672-2679
- [14] Wang Dongwei, Tian Yusen, Sun YueQiang, et al. Preliminary in-Orbit Evaluation of GNOS on FY3D Satellite [C]. *2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2018:9161-9163
- [15] Du Qifei, Liu Congliang, Li Wei, et al. The On-Orbit Performance of FY-3D GNOS [C]. *2019 International Geoscience and Remote Sensing Society Symposium*. 2019:7669-7671
- [16] Sun Yueqiang, Liu Congliang, Tian Yusen, et al. The Status and Progress of Fengyun-3e GNOS II Mission for GNSS Remote Sensing [C]. *2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2019:5181-8184
- [17] Cai Yuerong, Bai Weihua, Wang Xianyi, et al. In-orbit Performance of GNOS on-board FY3-C and the Enhancements for FY-3D Satellite [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(12): 2812–2821
- [18] Wu Yun, Liu Xiaolei, Liu Wanke, et al. Long-term Behavior and Statistical Characterization of BeiDou Signal-in-space Errors [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21:1907–1922
- [19] Zou Deyue, Cui Yongen, Zhang Qi, et al. Orbit Determination Algorithm and Performance Analysis of High-Orbit Spacecraft Based on GNSS [C]. *IET Communications*, 2019,12(20):3377-3382
- [20] Zhou Chen, Guo Shuren, Meng Yinan, et al. BDS-3 Spaceborne Receiver Design Applying to Space Service Volume [C]. *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2018 Proceedings*. 2018:341-354.
- [21] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Multi-GNSS Signal-in-space Range Error Assessment—Methodology and Results [J]. *Advances in Space Research*, 61(12):3020 – 3038
- [22] He Yilei. Quality Analysis of Satellite Signal for BDS-3 Simplest System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 394-402 (何义磊. 北斗三号最简系统卫星信号质量分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(3): 394-402)
- [23] Estey L, Meertens C. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data [J]. *GPS Solutions*, 1999,3:42–49
- [24] Wanninger L , Beer S. BeiDou Satellite-induced Code Pseudorange Variations: Diagnosis and Therapy [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19:639–648
- [25] Montenbruck O, Gill E. Satellite Orbits - Models, Methods and Applications [M]. 2000, Springer.
- [26] Zakharenkova I, Cherniak I. Underutilized Spaceborne GPS Observations for Space Weather Monitoring [J]. *Space Weather*, 2018,16(4):345–362
- [27] Zakharenkova I, Astafyeva E, Cherniak I. GPS and in situ Swarm Observations of the Equatorial Plasma Density Irregularities in the Topside Ionosphere [J]. *Planets and Space*, 2016, 68:120
- [28] Jakowski N, Wilken V, Mayer C. Space Weather Monitoring by GPS Measurements on board CHAMP [J]. *Space Weather*,2007,5(8)
- [29] Lin C H, Richmond A D, Liu J Y, et al. Theoretical Study of New Plasma Structures in the Low-latitude Ionosphere During a major Magnetic Storm [J]. *JGR Space Physics*, 2009 114(A5):303
- [30] Chen Yiding, Liu Libo, Le Huijun, et al. Equatorial Ionization Anomaly in the Low-latitude Topside Ionosphere: Local Time Evolution and Longitudinal Difference [J], *JGR Space Physics*, 2016, 121(7): 7166–7182
- [31] Sun Wei, An Jiachun, Wang Zemin. Analysis of Topside Ionosphere in Antarctica Based on Radio Occultation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(11): 1446-1452 (孙伟, 安家春, 王泽民. 利用掩星技术研究南极地区顶部电离层特性[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(11):1446-1452

Assessment of Position Performance of BDS for Space Application Based on FY-3D Satellite

WU Chunjun^{1,2,3,4,5}, *SUN Yueqiang*^{1,2,3,4,5}, *WANG Xianyi*^{1,3,4,5}, *BAI Weihua*^{1,2,3,4,5}
MENG Xiangguang^{1,3,4,5}, *DU Qifei*^{1,3,4,5}

1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190

4 Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

5 Joint Laboratory on Occultations for Atmosphere and Climate (JLOAC), Beijing 100190

Abstract: As BeiDou Satellite Navigation System-3 (BDS-3) starts to provide service for global users, it is possible to get global-coverage and all-time positioning service for space application using BDS alone. The performance of space-borne BDS positioning is thoroughly analyzed with the in-orbit data of GNSS Occultation Sounder (GNOS) aboard FengYun-3D (FY-3D) satellite. Firstly, the visibility and position dilution of precision (PDOP) of BDS satellites in different LEO orbits are calculated based on real BDS ephemeris, and the orbit and clock error of broadcast ephemeris and Signal-In-Space Range Error (SISRE) are studied. The results show that the global coverage usability from ground to 2000 Km height orbit has already been 100%. The mean visible BDS satellite number across the world is 50% larger than that of GPS. For BDS broadcast ephemeris, the 3-D orbit error is 1.5m and clock error is 2.4ns. SISRE is about 0.79m and the clock accuracy of BDS-3 has reached the same level of GPS. Second, the real visible satellite number, signal strength, precision of pseudo-range and position accuracy are verified with the measurement data of GNOS. The code biases of BDS-2 satellites are focused on. The in-orbit data results show that GNOS in FY-3D could get 100% positioning with BDS-2 signals in service areas, and 3-D position accuracy is 5.53m. All BDS-2 satellites including Geosynchronous Earth Orbit (GEO), Inclined Geosynchronous Orbit and Medium Earth Orbit satellites have code biases. When the elevation is less than 40 degree, the code bias of GEO is firstly measured directly. The total electron content above 836Km LEO orbit is measured using BDS dual-frequency measurements, which can cause relative pseudo-range delay of about 0.6m. The research in this paper is of great significance to the space-based application of BDS and lays the foundation for the design of space-based BDS receivers.

Key Words: BeiDou Navigation Satellite System, Space-borne Receiver, Positioning Performance, GNSS Occultation Sounder, FengYun-3D Satellite

First Author: WU Chunjun, Engineer, specializes in GNSS device development. E-mail: wuchunjun@nssc.ac.cn

Corresponding author: BAI Weihua, Professor. E-mail: bjbwh@163.com

Foundation Support: the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41505030, 41606206 and 41775034); the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Science (Grant No. XDA15007501); the Scientific Research Project of Chinese Academy of Science (Grant No. YZ201129); National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFB0502800, 2017YFB0502802)

标题: 风云三号 D 星天基 BDS 实时定位性能分析

作者: 吴春俊, 孙越强, 王先毅, 白伟华, 孟祥广, 杜起飞

收稿日期: 2020-04-23

DOI:10.13203/j.whugis20200187

引用格式:

吴春俊, 孙越强, 王先毅, 等. 风云三号 D 星天基 BDS 实时定位性能分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200187 (WU Chunjun, SUN Yueqiang, WANG Xianyi, et al. Assessment of Position Performance of BDS for Space Application Based on FY-3D Satellite[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200187)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

风云三号 C 卫星星载 GPS/BDS 分米级实时定轨模型研究

王甫红, 凌三力, 龚学文, 郭磊

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(1): 1-6

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180385>

GPS/Galileo/BDS-3 试验星短基线紧组合相对定位性能初步评估

吴明魁, 刘万科, 张小红, 田文文

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(1): 13-20

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180269>

基本导航模式下 BDS-3 卫星地影期间的定轨精度分析

李晓杰, 刘晓萍, 祖安然, 徐君毅, 刘帅, 辛洁, 郭靖蕾

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(6): 854-861

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190110>