

北斗三号与北斗二号卫星导航系统的差异

曹有权^{1, 2}

1. 中国电子科技集团公司第二十研究所 陕西 西安 710068

2. 陕西省组合与智能导航重点实验室 陕西 西安 710068

摘要: 北斗卫星导航系统(BDS)作为中国自主研发的全球卫星导航系统,从针对区域服务的北斗二号卫星导航系统,发展到面向全球覆盖的北斗三号卫星系统,标志着我国在时空基准体系建设中的重大突破。本文从系统架构、技术性能、服务能力等维度,对比分析了北斗三号与北斗二号卫星系统的核心差异,展现了我国北斗系统的发展进步,为其后续应用与发展提供参考。

关键词: 北斗三号; 北斗二号; 卫星导航系统; 差异分析

1 引言

我国的北斗卫星导航系统是自主建设、独立运行的全球卫星导航系统,北斗二号系统于2012年12月正式开通运行,为亚太地区提供服务。北斗三号系统于2020年7月31日正式开通,实现全球组网,向全球用户提供服务。两者在系统构成、信号体制、性能指标、服务功能等方面存在诸多差异。全面研究这些差异,有助于更好地理解北斗卫星导航系统,充分发挥北斗系统的优势,推动其在更多领域的广泛应用。

2 系统构成差异

2.1 星座构型优化

北斗三号卫星导航系统相对北斗二号卫星导航系统,对星座构型进行了优化。包括卫星数量、轨道类型、覆盖范围,实现了从区域服务到全球服务的技术跨越,具体对比如下表1所示。

表1 北斗三号和北斗二号星座构型差异

序号	参数	北斗二号	北斗三号
1	卫星数量	14颗 (5GEO+5IGSO+4MEO)	35颗 (3GEO+3IGSO+24MEO+5备份)
2	轨道类型	区域混合星座	全球混合星座
3	覆盖范围	亚太地区 南北纬55度,东经55度至180度	全球覆盖(地球任何地点可见4颗以上卫星)

北斗二号系统由5颗地球静止轨道卫星(GEO)、5颗倾斜地球同步轨道卫星(IGSO)和4颗中圆地球轨道卫星(MEO)组成,这种星座布局主要侧重于亚太地区的覆盖。

北斗三号系统由3颗地球静止轨道(GEO)卫星、3颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星和24颗中圆地球轨道(MEO)卫星及5颗备份星组成。GEO卫星轨道高度35786千米,分别定点于东经80度、110.5度和140

度;IGSO卫星轨道高度35786千米,轨道倾角55度;MEO卫星轨道高度21528千米,轨道倾角55度,分布于Walker24/3/1星座^[1]。

北斗三号与北斗二号相比,MEO卫星数量大幅增加,且通过精心设计的轨道参数,使得卫星在全球范围内的分布更加均匀,实现了真正意义上的全球覆盖。通过数据分析监测站跟踪的卫星数,BDS2可跟踪到的卫星数量为10~16颗;BDS3可跟踪到的卫星数量为18~26颗^[2]。加入北斗三号卫星后,平均可见北斗卫星数由10.3颗增加至19.4颗^[3]。

2.2 信号体制创新

北斗三号卫星导航系统在继承和保留北斗二号卫星B1I、B3I信号的基础上,新增了B1C的公开信号。并且对B2信号进行了升级,实现了信号性能的提升,同时充分考虑了与其他卫星导航系统的兼容与互操作,具体差异见如下表2所示。

表2 北斗二号和北斗三号信号体制差异

序号	参数	北斗二号	北斗三号
1	频点数量	3个(B1I、B2I、B3I)	5个,新增B1C、B2a、B2b
2	调制方式	BPSK	BOC(1,1)、MBOC等
3	兼容性	与GPS L1部分兼容	实现与GPS L1/L5、Galileo E1/E5全频段互操作

2.2.1 信号频率

北斗二号在B1、B2和B3三个频段,提供了B1I、B2I和B3I三个公开服务的信号。北斗三号在此基础上,新增了B1C、B2a两个频点,并将B2I更改为B2b,即北斗三号共5个频点信号: B1I、B1C、B2a、B2b和B3I。

新增的B1C信号与国际其他卫星导航系统的信号兼容互操作性能更好,有利于促进多系统融合应用;B2a填补北斗全球服务频段空白,与GPS L5、Galileo E5a同频,

实现多系统互操作。B2b通过高码速率设计，提升抗干扰能力，同时用于播发差分校正信息，提升定位精度。B1C、B2a信号只在北斗三号中的MEO卫星和IGSO卫星上播发，不在GEO卫星上播发^[4]。

2.2.2 调制方式

北斗二号信号采用二进制相移键控（BPSK）调制方式，满足当时的技术实现和系统性能要求，在实现上相对简单，但在信号的频谱利用率和抗干扰能力等方面存在一定的局限性。

北斗三号信号采用了更先进的调制方式，以提高信号的性能和兼容性。B1C 信号包含数据分量 B1C_data 和导频分量B1C_pilot。数据分量采用二进制偏移载波（BOC（1，1））调制；导频分量采用正交复用二进制偏移载波（QMBOC（6，1，4/33））调制^[5]，这种调制方式在频谱特性上具有更好的兼容性，能够与其他卫星导航系统的信号在相同频段内共存，减少信号之间的干扰；同时，该方式还具有更高的频谱利用率，能够在有限的带宽内传输更多的信息，提高信号的传输效率。B2a信号采用AltBOC（15,10）调制方式，通过双频联合传输实现高精度服务。

2.3 原子钟升级

原子钟的性能指标，特别是稳定性和漂移率是卫星的关键指标，其直接关系着卫星的定位、测速和授时功能的精度，对整个卫星导航系统的服务性能有直接影响。

北斗三号卫星上铷钟实现100%国产化，摆脱了对进口铷泡的依赖，且更高稳定性和更小漂移率。氢原子钟首次实现星载应用，技术指标达到国际领先水平。北斗三号部分MEO卫星同时搭载1台铷钟和1台氢钟，实现双钟热备份，提高了系统的可靠性。同时，北斗三号星载时频系统增加了卫星钟完好性监测与卫星钟自主平稳切换等功能，多个原子钟保持同步，当主工作原子钟在轨出现故障后，卫星能够自主诊断并平稳切换，保证卫星时频信号的连续性，极大提高了导航信号与服务的可靠性和完好性。

北斗二号与北斗三号原子钟具体情况如下表3所示。

表3 北斗二号和北斗三号星载钟对比

序号	参数	北斗二号	北斗三号
1	主用钟型	铷原子钟（进口为主）	国产铷原子钟（全系统标配）
2	新增钟型	无	氢原子钟（部分MEO卫星搭载）
3	频率稳定度	1×10 ⁻¹³ /天	1×10 ⁻¹⁴ /天（铷钟） 3×10 ⁻¹⁵ /天（氢钟）
4	长期稳定性	依赖地面站频繁校时	氢钟长期稳定性提升，自主运行60天无需校正
5	寿命	8年	12年（氢钟无衰减特性）

2.4 星间链路技术

北斗三号首次引入Ka频段星间链路技术，采用相控阵天线等星间链路设备，实现星间双向精密测距和通信。通过该技术，所有北斗卫星连成一个大网，每颗星之间可以“通话”、测距，实现了星间、星地传输功能一体化设计。这使得卫星定位精度大幅度提高，同时各个卫星的星载原子钟之间可以同步走，提高了整个导航系统时间同步的精度。

同时通过星间和星地链路，实现对境外卫星的监测、注入功能，实现对境外卫星“一站式测控”的测控管理，减少了对地面站的依赖，通过星间测距与数据交换，境外段定轨精度达2-3厘米（较BDS-2提升50%），提高了整个系统的定位和服务精度。

3 性能指标差异

3.1 定位精度

北斗卫星导航系统定位精度和卫星轨道误差、时钟误差、电离层和对流层延迟等因素有关。北斗二号系统对这些误差源的修正相对有限，主要为亚太地区提供服务，其定位精度在亚太地区一般能达到10米左右。

北斗三号对这些影响定位精度的因素进行了全面改进，采用了更高精度的卫星轨道测定和维持技术，减少卫星轨道误差；配备了高性能的原子钟，降低时钟误差；通过建立更精确的电离层和对流层模型，以及采用多频信号组合等技术手段，有效削弱电离层和对流层延迟对定位精度的影响。此外，北斗三号还利用星间链路技术，实现卫星之间的相互测距和数据传输，进一步提高了卫星的自主定轨能力和时间同步精度，从而显著提升了系统的定位精度。具体对比如下表所示。

表4 北斗二号和北斗三号定位精度对比

序号	服务类型	北斗二号	北斗三号	备注
1	亚太地区	水平10m 高程10m (95%)	水平5m 高程5m (95%)	北斗三号通过新增频率（B1C/B2a）和星间链路提升精度
2	全球服务	不提供全球服务	水平10m 高程10m (95%)	北斗三号MEO卫星全球分布，B2a/B1C信号覆盖全球
3	PPP服务	无	实时厘米级	北斗三号B2b信号提供服务

3.2 授时精度

时间基准主要依赖于卫星上的原子钟和地面时间同步系统，北斗三号系统通过升级原子钟，地面段通过优化时间同步算法和采用更先进的时间传递等技术，北斗三号系统的授时精度由北二的50纳秒提升到20纳秒，达到了国际先进水平，具体如下表所示。

表5 北斗二号和北斗三号时间基准对比

序号	参数	北斗二号	北斗三号	备注
1	时间基准来源	铷原子钟（进口为主）	铷原子钟(国产)+ 氢原子钟（部分卫星）	氢钟长期稳定性提升1-2个量级
2	频率稳定度	$1\times 10^{-13}/\text{天}$	$1\times 10^{-14}/\text{天}$ （铷钟） $3\times 10^{-15}/\text{天}$ （氢钟）	氢钟长期稳定性减少时间累积误差
3	时间同步误差	10纳秒（依赖地面站校正）	< 3纳秒（星间链路自主同步）	星间链路实时校正，降低对地面站的依赖
4	授时精度	50纳秒（开放服务） 10纳秒（授权）	20纳秒（开放服务） 5纳秒（授权）	多频信号联合解算抑制电离层延迟
5	自主运行能力	依赖地面站每日校正	无地面支持运行60天，误差< 5纳秒	氢钟长稳+星间链路自主维持时间同步

3.3 测速精度

北斗二号系统的测速精度一般优于0.2米/秒，这一精度在一些对速度测量要求不是特别高的应用场景中能够满足需求，如普通车辆的行驶速度监测。

北斗三号卫星导航系统中，北斗三号支持B1C+B2a+B3I多频联合测速，通过电离层误差差分消除，能够降低速度解算误差；原子钟稳定度的提升，减少了多普勒频移测量误差；B2a频点的AltBOC（15,10）调制带宽更宽（30.69MHz），抗多径效应能力增强，动态场景测速稳定性提升。最终北斗三号卫星系统测速精度提升至0.1米/秒，为高精度动态应用提供了可靠的技术支撑。

4 扩展服务功能差异

北斗三号通过技术创新实现了扩展服务能力的全面升级，主要体现在短报文通信、高精度服务和国际搜救服务等方面。

4.1 短报文通信

北斗二号系统提供短报文通信服务，但限于区域通信且通信容量相对有限，区域短报文水平为120汉字/次，主要适用于一些对信息量要求不高、实时性要求相对较低的简单信息传输，如海洋渔业中的渔船位置报告和简单的指令传达。

北斗三号通过GEO卫星扩频与星间链路中继，区域短报文水平升至1000汉字/次，支持紧急场景下的多媒体信息传输。依托MEO卫星全球转发能力，首次实现全球短报文服务40汉字/次，支持双向通信与位置报告，为无通信网络区域提供应急通信保障，如海上安全监测应用利用北斗三号短报文通信服务可有效提升企业海上管理能力^[6]。

4.2 高精度服务

北斗二号无实时精密单点定位服务，仅支持标准定位服务，定位精度为米级，需要借助地面GBAS系统采用差分定位才能实现厘米级定位。

北斗三号新增精密单点定位（PPP）服务：通过B2b信号实时播发卫星轨道、钟差改正数及电离层模型，用户端无需地基增强系统即可实现动态分米级、静态厘米

级的精密定位服务能力。

4.3 国际搜救服务

北斗二号系统不支持国际搜救服务。北斗三号集成国际卫星搜救系统，具备返向链路确认功能，当遇险终端发射求救信号时，北斗卫星可实时回传救援受理信息至用户端，显著提升搜救效率（响应时间 ≤ 10分钟）。经测试验证，搜救终端发射的406.5MHz报警信号能正确地被北斗搜救载荷转发至1544.21MHz,境外地面站能够接收北斗搜救载荷的下行信号^[7]。

5 结论

本文全面分析了北斗三号系统和北斗二号系统在星座构型、信号体制及原子钟的差异，以及北三系统通过对于星间链路技术的应用，使得北斗三号系统在定位、授时和测速等核心精度指标大幅提升。同时总结了北三系统在短报文通信、高精度服务和国际搜救服务等扩展服务能力的全面升级。该分析研究，为我国北斗三号系统的快速推广应用提供参考。

参考文献

[1]北斗卫星导航系统公开服务性能规范（3.0版）
[2]吕琳，韩明，张建军等.北斗三号与北斗二号卫星信号对比分析[J].数字技术与应用,2022,40(3):14-16
[3]马会林,吴文坛，吴秀丽,亚太区域北斗三号对北斗二号精密单点定位的增强效果分析[J].测绘通报，2022(1):56-60
[4]中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号B2a(1.0版)
[5]《北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号B1C（1.0版）》
[6]田金伟.基于北斗三号短报文通信技术的海上安全监测应用[J].信息化应用，2023(3):49
[7]蔡洪亮,孟轶男,耿长江等.北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估:定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J].测绘学报，2021,50（4）：427-435