

北斗系统新进展—— BD3试验验证系统性能分析

地理信息国家重点实验室
北京卫星导航中心



1. 背景

■ 北斗系统建设需求与发展

- 北斗卫星导航系统源于国防需求和国家经济建设需求，也服务于国防、服务于国家经济建设
- 北斗系统是国家PNT的核心基础设施
- 北斗发展策略是合理的，但不算是最优的（受当时的经济基础和技术基础），因为最优策略应该是统一的顶层设计，而且是优化设计
- 已经完成的北斗1和北斗2发挥了极其重要的作用，为北斗全球系统建设奠定了基础
- 北斗3是在北斗1和北斗2基础上设计和发展起来的



1. 背景

■ 全球北斗卫星导航系统的现实意义

- 国家经济战略全球化，北斗服务应该全球化
- 国家海洋战略需要全球北斗不是区域北斗
- 一带一路战略也需要全球的北斗不是区域北斗
- 经济强国、国防强国、政治大国都需要全球北斗系统的支撑，所有局部的高精度时空服务支撑不了国防强国或经济强国
- 全球世情监测也需要全球北斗
- 习主席2016年创新大会：“深空、深海、深地”需要全球PNT服务能力的支持

2. 北斗系统进展

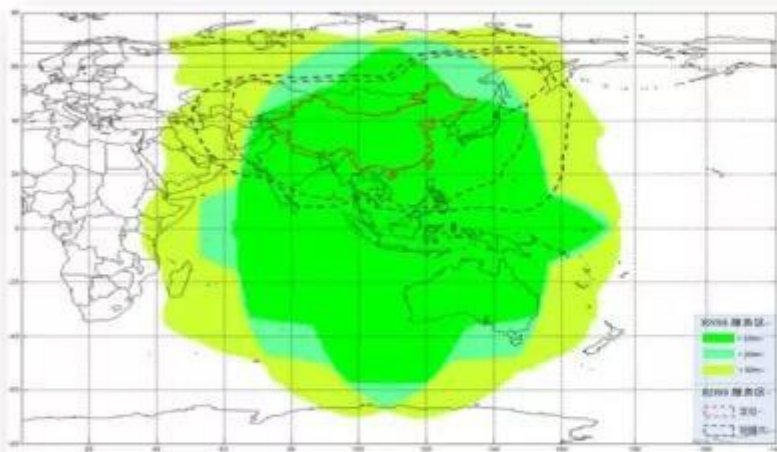
■ 北斗2系统 (BDS-2) 现状

- **BDS2**: 2012年12月运行, 14颗卫星组成 (5GEO+5IGSO+4MEO)
- **RDSS+RNSS**体制, 具有鲜明的特色
- **服务区域**: 南北纬55度, 东经55度至180度; 精度10米
- 较少的卫星实现中国及周边的覆盖, 可用性好
- **BD2**的部分卫星设计寿命已接近到限, 服务性能维持具有一定困难

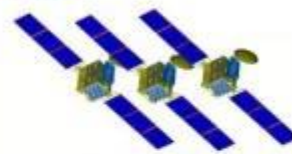


2. 北斗系统进展

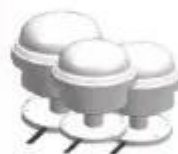
■ 北斗二号天基增强系统——米级或分米级服务



1个注入站



3 颗同步卫星



30个监测站



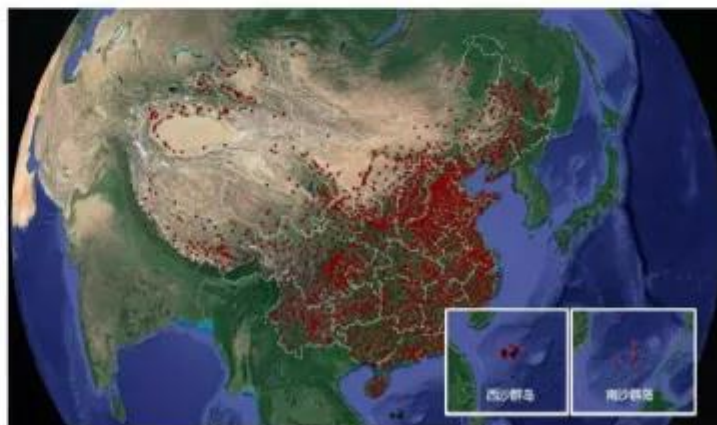
1个运控中心

- 由BDS监测站观测BDS信号计算差分改正数，通过3颗GEO卫星播发差分改正数，可以提供中国区域**米级或分米级定位服务**（周建华团队成果）

2. 北斗系统进展

■ 北斗二号平稳过渡与地基增强

- 为确保北斗二号系统稳定运行，2016年又发射2颗在轨备份卫星，进一步提升可用性和定位精度，定位精度由10米提高到8米
- 2017年6月7日“北斗地基增强系统”通过验收，可为**监测范围内用户**带来米级、分米级、高精度服务，可望应用于车道级导航、精准农业等领域



3. 北斗3试验系统性能

■ 北斗全球卫星导航系统(BD-3)试验系统

- 已经发射5颗BD3试验卫星

2颗 IGSO: I1-S、I2-S

3颗MEO: M1-S, M2-S & M3-S

- 试验了四个频率信号，含S频率

B1 (1575.420MHz)

B2 (1191.795MHz)

B3 (1268.520MHz)

Bs (2492.028 MHz)

- 增加Ka星间链路（自主导航）
- 搭载了新的星载氢钟





3. 北斗3试验系统性能

■ BD-3试验系统主要验证内容

- ✧ 测试了各类技术体制的设计状态
- ✧ 测试了卫星与运控的协同状态
- ✧ 开展了星间链路的综合验证
- ✧ 开展了上行注入与下行接收验证及下行信号质量监测评估
- ✧ 系统时间体制验证评估
- ✧ 精密定轨体制验证评估
- ✧ 系统定位、测速和授时（PVT）指标验证评估
- ✧ 达到预期目标



3. 北斗3试验系统性能

■ BD-3试验系统频率比较

Band	Freq/MHz	GPS	Galileo	BDS2	QZSS	IRNSS	Test Sys3
S	2492.028					Bs	Bs
L	1575.420	L1	E1		L1		B1
	1561.098			B1			
	1278.750		E6				
	1268.520			B3			B3
	1227.600	L2			L2		
	1207.140		E5b	B2			B2b
	1191.795		E5				B2a+b
	1176.450	L5	E5a		L5	L5	B2a

- 全球系统信号与GPS、Galileo、QZSS和IRNSS系统间重叠信号增多，将有利于各GNSS系统间的兼容使用
- Bs频点信号仅在I2-S和M1-S卫星上播发

3. 北斗3试验系统性能

■ 运控与测控系统相对BD2的变化

- 增加星间链路的运控与测控，有望改善卫星几何结构，提升卫星服务性能
- 增加导航电文质量监测系统
- 采用检验与故障诊断技术，维护测控系统的连续性
- 时间尺度由组合原子时生成，采用光纤链路进行时间频率双向传递，提高时间同步精度
- 将监测BDST和其他GNSST的时差





3. 北斗3试验系统性能

■ 监测系统的改进

- 为了全面监测新信号性能，每个监测站设定两类接收机
- ✓ 每个站配置两台监测接收机：同时接收BD-2信号和BD-3新体制信号多频终端
- ✓ 装配有GPS、Galileo等互操作信号接收处理能力的兼容终端
- L/S一体化天线，同时监测BD-2平稳过渡信号、全球信号和GPS信号
- 监测站之间采用数传抗干扰技术，使系统具有更强的干扰监测和抑制能力
- 采用了高精度数据传输技术



3. 北斗3试验系统性能

■ 系统性能改进（时间同步、测距、定位精度）

- 星载铷原子钟天稳定度E-14量级，氢原子钟天稳为E-15量级（提高一个量级）
- 星地、星间和站间时间同步精度约为0.14ns
- 卫星钟差2小时预报精度约为0.4ns，优于BD-2结果
- 监测接收机测距误差最低0.04ns
- 多频终端测距精度0.1m-0.4m，测速精度0.03m/s（95%）
- 授时精度约为10ns水平
- 试验卫星B1I/B3I单双频定位水平精度3.5m-4.3m、高程精度3.8m-5.9m



3. 北斗3试验系统性能

■ 系统性能改进（时间同步、测距、定位精度）

- 星地观测数据多星定轨三维位置精度优于1.5m，预报2小时URE精度约为0.5m
- 星地/星间联合定轨精度1m，预报2小时空间信号精度0.31m，优于仅星地观测定轨精度（陈金平、胡小工等成果）
- 星地/星间链路观测数据组合定轨，轨道T方向精度大幅提升，定轨精度提升63.1%，轨道预报精度提升75.7%（由于增加卫星T、N方向观测约束）
- 星地/星间联合预报精度：IGSO由0.4ns提高至0.3ns，MEO由1.1ns提高至0.5ns；比仅采用星地观测预报精度提升了53.9%



3. 北斗3试验系统性能

■ 电离层延迟模型改正试验结果

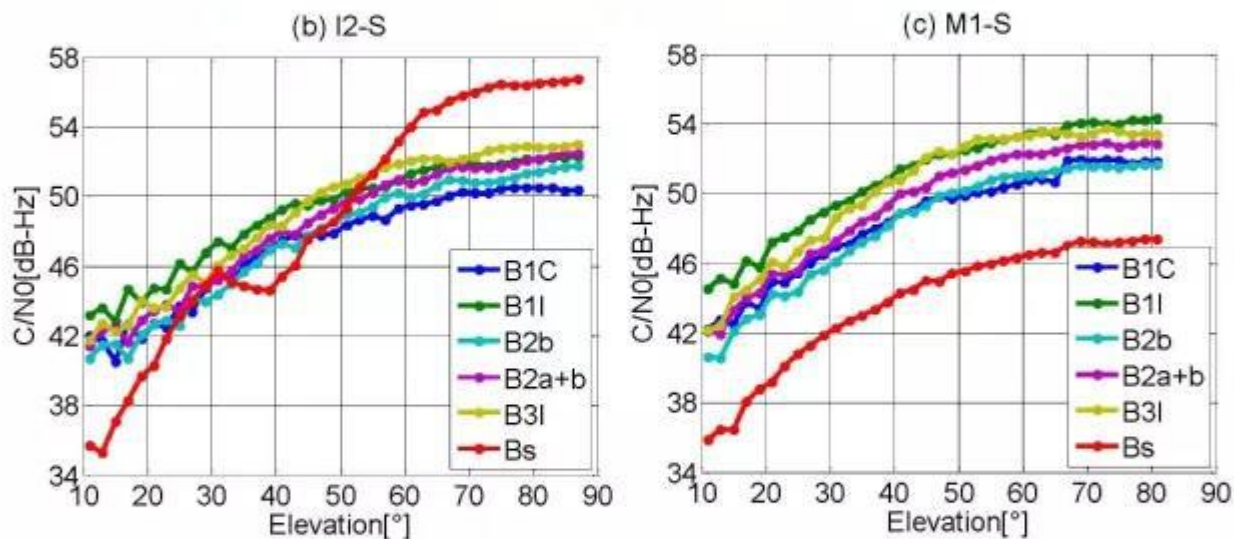
- 14参数Klobuchar模型和BDSSH模型对境内电离层延迟改正精度有明显提高
- BDSSH模型精度略高于14参数Klobuchar模型，BDSSH模型在境外改正精度也有改进（袁运斌团队结果）

■ 差分及完好性处理试验结果

- 具备BDS基本完好性
- 具备利用BD-2/BDS试验卫星/GPS数据融合生成格网电离层参数

3. 北斗3试验系统性能

■ 信噪比分析——信噪比随高度角变化情况



- 各频点信号的信噪比与高度角相关趋势几乎相同
- **Bs**信号（红色曲线）表明Bs信噪比较低



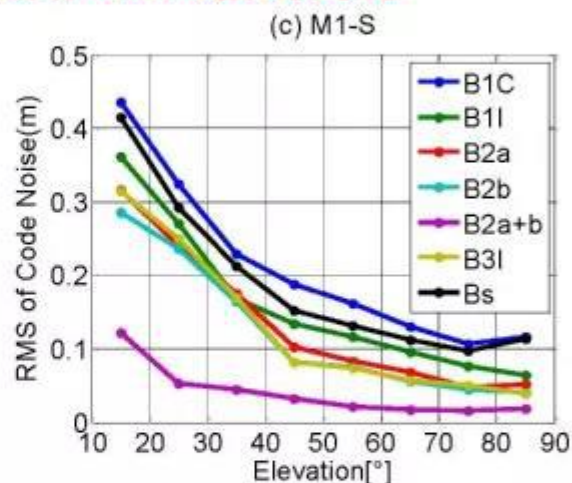
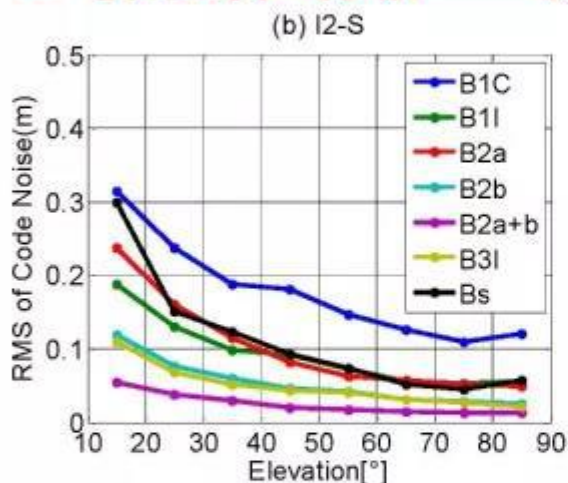
3. 北斗3试验系统性能

■ 信噪比分析——信噪比随高度角变化情况

- 相同高度角条件下，MEO卫星信噪比要比IGSO卫星高2-3dB，可能因为IGSO卫星轨道高度更高，卫星发射功率偏低所致
- Bs频点信噪比变化异常：
 - I2-S卫星**：Bs频点信噪比随高度角变化跨度大，当高度角较大时，信噪比显著提升
 - M1-S卫星**：Bs频点信噪比与其它频点相比明显偏低

3. 北斗3试验系统性能

■ 伪距噪声分析——伪距噪声随高度角变化



- 各频点伪距噪声均随高度角增大而减小，且当高度角大于50度时趋于稳定
- 在相同高度角条件下，**B1C**信号伪距噪声RMS明显高于其它信号，**B2a+b**信号伪距噪声RMS明显低于其它信号

3. 北斗3试验系统性能

■ 伪距噪声分析——伪距噪声RMS统计精度

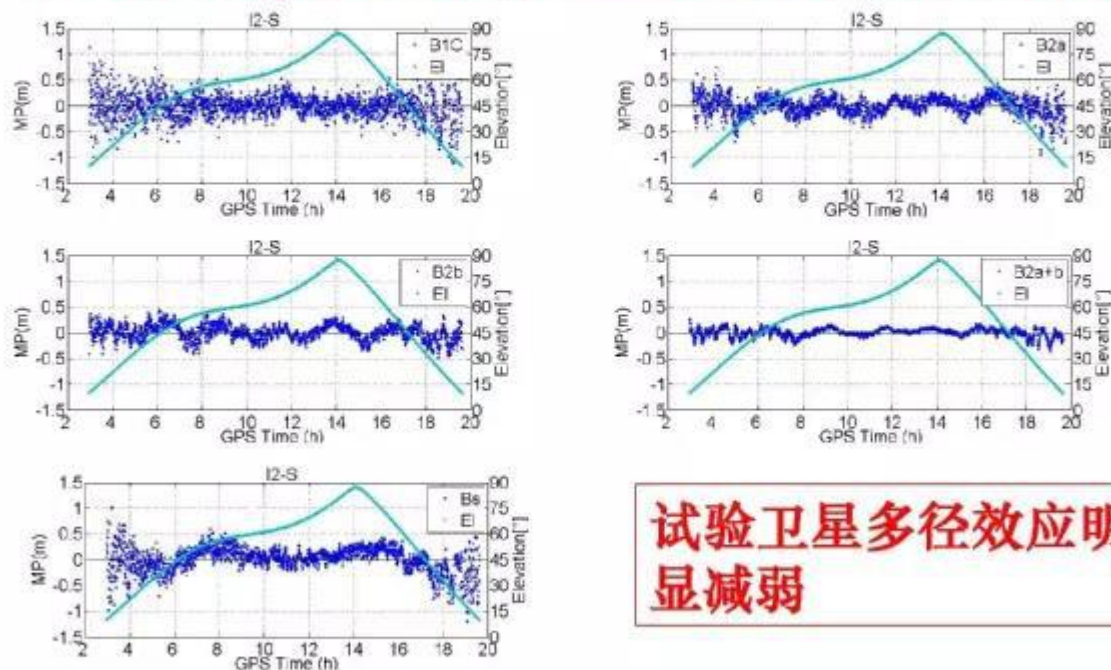
卫星	B1		B2			B3		Bs
	B1I	B1C	B2a	B2b	B2a+b	B3I	B3C	
I1-S	0.10	--	--	--	--	0.06	--	--
I2-S	0.10	0.18	0.11	0.06	0.03	0.05	--	0.12
M1-S	0.23	0.28	0.20	0.19	0.07	0.20	--	0.26
M2-S	0.23	0.29	0.22	0.19	0.07	0.21	--	--

- 同一信号伪距测量精度在同类卫星间基本一致
- MEO卫星伪距噪声RMS统计精度要差于IGSO卫星
- 在各导航信号中，B1C信号伪距测量精度最差
- 在各导航信号中，B2a+b信号伪距测量精度最优
- Bs频点伪距测量精度较差，但优于B1C频点



3. 北斗3试验系统性能

■ 卫星伪距多径分析——伪距多径时间序列分析

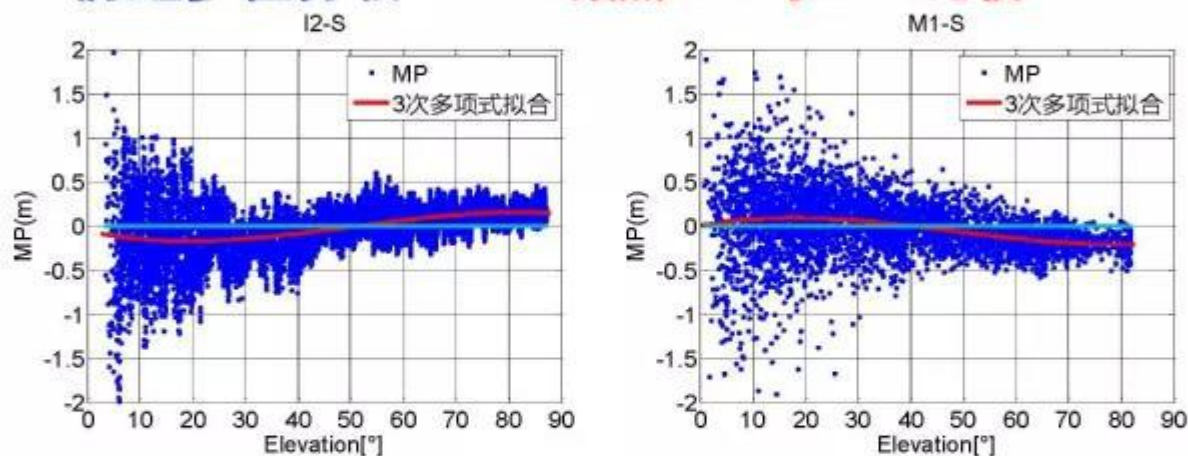


试验卫星多径效应明显减弱

试验卫星全球系统信号伪距多径时间序列

3. 北斗3试验系统性能

■ 伪距多径分析——Bs频点I2-S与M1-S比较

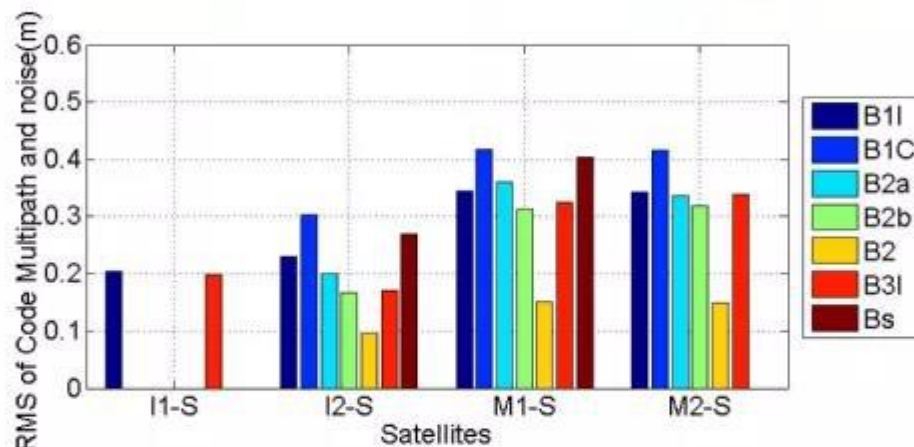


Bs频点信噪比随高度角变化情况

- 北斗试验卫星全球系统Bs频点伪距多径存在系统性误差
- 全球系统其它频点信号中未见明显类似偏差，**是天线位置问题吗？**

3. 北斗3试验系统性能

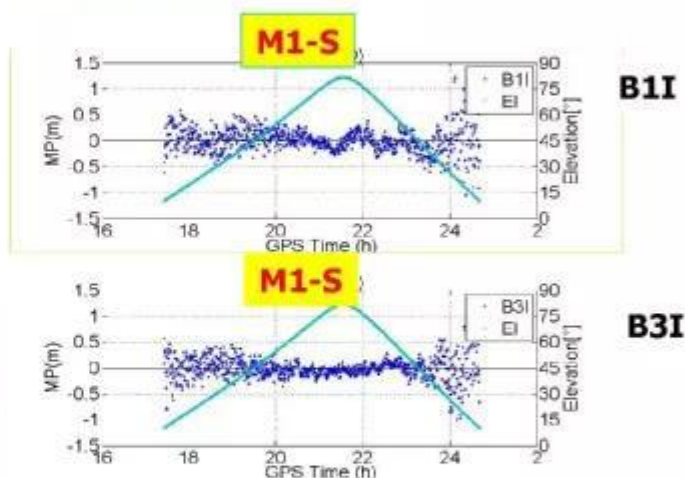
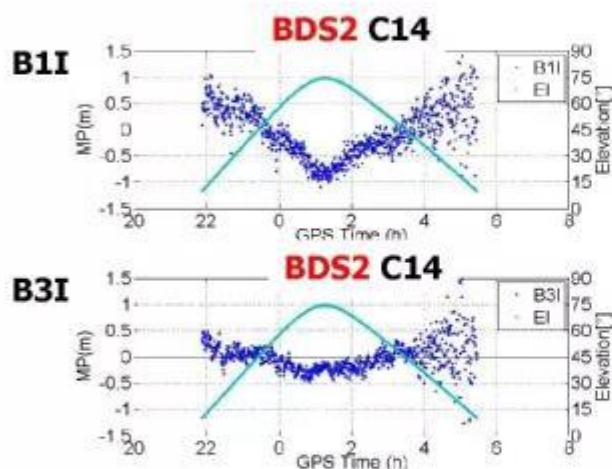
■ 伪距多径分析——各频点伪距多径RMS统计值



- MEO卫星伪距多径RMS统计值要大于IGSO卫星，可能由于MEO卫星观测时段的低高度角观测数量比例较大
- 各导航信号中，B2a+b信号抗多径能力最强
- 各导航信号中，B1C信号抗多径性能最差

3. 北斗3试验系统性能

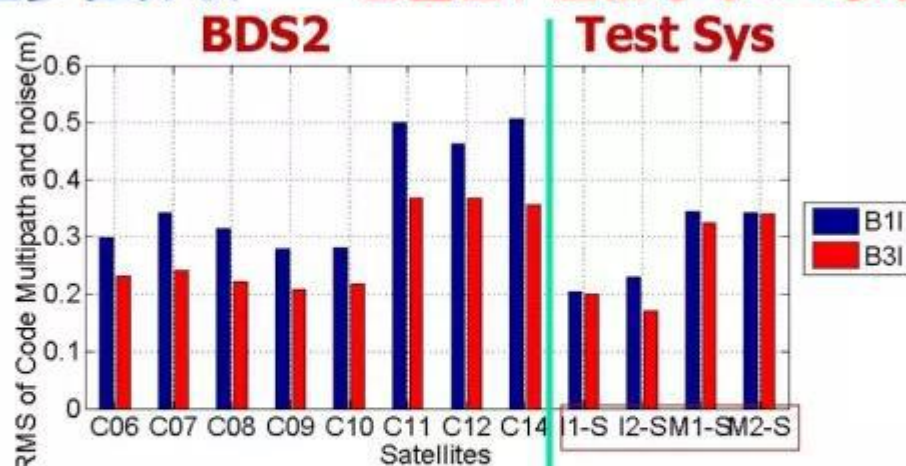
■ 伪距多径分析——试验星与BD-2同类星比较



- BD-2伪距观测中存在与高度角相关的系统性偏差，该偏差在B1I频点上较大
- 试验卫星B1I和B3I频点信号多径序列变化正常，未见明显类似偏差

3. 北斗3试验系统性能

■ 伪距多径分析——全星座、全信号与BD-2多径比较



Bs频点信噪比随高度角变化情况

- 试验卫星**B1I**和**B3I**信号伪距多径小于BD-2同类卫星
- BD-2卫星伪距多径中存在与高度角相关的系统性偏差，导致其RMS统计结果较差

3. 北斗3试验系统性能

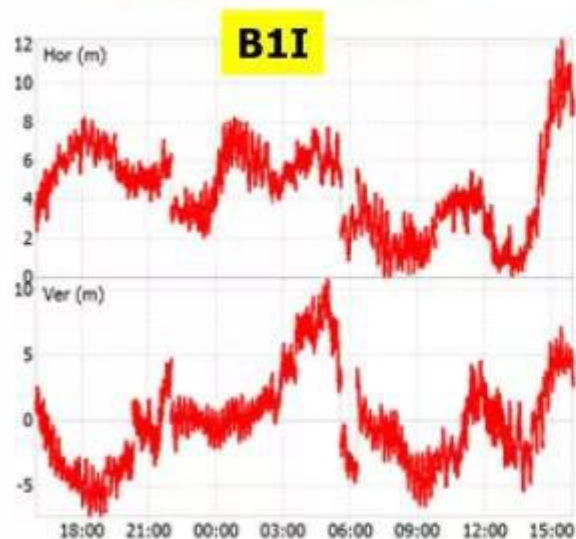
■ 空间信号精度

信号		I1S均值	M1S均值	M2S均值	I2S均值
单频 UERE	B1I	0.63	0.65	0.44	0.62
	B1Cd	-	0.59	0.32	0.64
	B1Cp	-	0.63	0.27	0.74
	B2ad	-	0.60	0.40	0.06
	B2ap	-	0.48	0.42	1.32
	B2bd	-	0.64	0.61	0.88
	B2bp	-	0.63	0.52	0.75
	B3I	0.97	0.13	0.14	0.79
双频 UERE	B1I/B3I	0.35	0.20	1.06	0.29
UERE平均		0.73	0.42	0.44	0.63

试验终端监测的用户等效距离精度优于0.73米

3. 北斗3试验系统性能

■ 单频定位精度 (RMS)



BD-2 多频接收机+I1/M1/M2/I2



BD-2 多频接收机r+I1/M1/M2/I2

B3I定位结果优于B1I结果



3. 北斗3试验系统性能

■ 定位精度（使用不同用户接收机的结果）

试验项	多频接收机 B1I	多频接收机 B3I	兼容接收机 B1I
	H / V	H / V	H / V
仅BDS-2	5.51/8.09	4.71/7.32	4.23/7.73
BDS-2+4 sat	5.08/7.68	3.77/6.92	3.22/6.58

- 水平精度：3.5m-4.3m；高程精度：3.8m-5.9m (B1I / B3I)
- 注明：仅用试验卫星不能完成高精度定位，因为卫星个数太少，于是仅讨论信号精度更有意义



3. 北斗3试验系统性能

■ 定位精度（监测型接收机）

频点		7日	8日	9日	10日	11日	12日	13日
B1	H	3.29	2.94	3.81	3.27	3.60	3.30	3.09
	V	5.01	5.37	5.32	5.26	4.83	5.78	5.05
B1+B3	H	4.39	4.66	4.48	3.60	4.90	4.21	4.54
	V	6.14	6.78	5.96	6.12	6.86	6.37	6.70
PDOP		3.74	3.39	3.21	3.08	3.36	3.66	3.99

备注：基于一期卫星B1I信号、二期卫星B1I和B3I信号，分别采用单频和双频定位算法进行定位，并与已知坐标值进行比较。分别计算当日0-24h内水平（H）和垂直（V）分量定位误差，单位：米，置信度95%——水平不确定度：3-4m，垂直：5-6.7m

3. 北斗3试验系统性能

■ 时间精度

Item		I1S	M1S	M2S	I2S
多频接收机	B1I	7.36	8.48	7.10	9.05
	B1C	—	9.66	4.50	10.27
	B2a	—	13.68	5.00	9.49
	B2b	—	6.18	5.37	7.61
	B2	—	10.25	8.10	5.73
	B3I	12.59	7.41	6.23	7.13
兼容接收机	B1I	11.89	6.53	12.78	21.95
	B1C	—	4.98	7.80	21.71
	B2a	—	4.31	8.74	11.48

- 大多数信号时间精度好于10ns，最差的精度为21.9ns
- 不同终端、不同信号精度略有差异



3. 北斗3试验系统性能

■ 试验系统服务性能小结

- 兼容终端测距精度0.4m-1m, 测速精度0.17m/s
- 试验卫星授时精度11ns-28ns
- 监测接收机 $MERE < 1.23m$
- 监测接收机仅用4颗卫星定位精度为:
 - ✓ 水平精度 $< 4.90m$
 - ✓ 垂直精度 $< 6.85m$
- 使用用户型接收机:
 - ✓ 水平精度 $< 5.51m$
 - ✓ 垂直精度 $< 8.09m$



3. 北斗3试验系统性能

■ 试验系统小结

- 发射了5颗试验卫星，3颗MEO、2颗IGSO
- 建成1个试验主控站、1个试验注入站、7个试验监测站组成的地面运控系统，为北斗全球系统的研制建设奠定了基础
- 采用多站多星综合守时体制
- 基于钟差约束的多星定轨体制
- 基于星地/站间/星间观测数据进行轨道与钟差联合测定体制，实现星历星钟一体化解算
- RNSS基本导航和RNSS增强导航一体化运行
- 星地一体化系统控制与管理、星地一体化信息传输



3. 北斗3试验系统性能

■ 试验系统小结

- 设计了适合星载一期和二期PRM编码参数和时效参数
- 采用了18参数广播星历模型和9参数的BDSSH全球电离层延迟模型
- 短期与中长期相结合的钟差预报模型
- 实现BDT/GPST时差监测
- 采用组合钟模式建立了多站多星方式的系统时间基准
- 并采用集中-分布式为各系统运行设备提供时频信号，缩短了测量设备的电缆长度，为设备时延稳定性指标的提升奠定了基础



3. 北斗3试验系统性能

■ 试验系统小结

- 将BDT (E) 末端参考信号一致性由一期的0.5ns提升到了0.3ns
- 频率准确度从 5×10^{-13} 提高到 6×10^{-14} 、频率稳定度从 2×10^{-14} (1d) 提高到 6×10^{-15} (1d)
- 设计了基于多种约束条件的多星定轨和卫星钟差测定方法及轨道机动后恢复期间的轨道快速恢复方法
- 时间同步测定不确定度达0.14ns
- 卫星钟差预报2小时不确定度达0.04ns，卫星钟差预报精度提升50%

4. 北斗全球系统进展

■ 北斗全球系统 (BD-3) 基本设计

- 2016年9月正式启动北斗全球卫星导航系统工程建设
- 北斗3将按照国际标准提供星基增强服务 (SBAS) 及搜索救援服务 (SAR)
- 北斗3将增设星间链路, 便于北斗卫星境外弧段的精度保持
- 星间链路便于无地面支持情况下的卫星轨道的互相测定与维持, 便于时间基准的维持, 便于实现自主导航





4. 北斗全球系统进展

■ 北斗3运控系统主要变化

- 将增加星间链路测控，提高MEO/IGSO卫星监测范围，提升系统服务精度和可用度
- 将采用数据光纤传输，保证系统设备时延的稳定性
- 时间建立模式由主钟模式改为综合原子钟模式，增加与GPS的时差监测功能，规避单钟模式风险，提升系统时间建立和维持的可靠性（涉及先进算法）
- 将支持多系统、多频点、多模式信号的高精度、连续实时观测和业务处理



4. 北斗全球系统进展

■ 北斗3信息处理系统可能的技术变化

- 新增自主导航业务处理子系统和仿真测试与评估子系统
- 轨道与钟差计算增加星间观测数据
- 增加我国学者自研的电离层改正模型和软件
- 软件算法优化（算法、数据处理策略）
- 增加并行运控模式，提高运控系统稳健性（Robustness，算法）
- 增加备份运控和机动运控
- 增加星间自主运控功能

5. 综合PNT系统（北斗+）

GNSS PNT服务的脆弱性



- 国防、电力、金融等**核心基础设施及核心用户**需要连续高可靠的PNT服务

- **必须保证PNT服务的坚韧、可靠、全空间服务**

- 天空布满各类PNT卫星，信号仍然会被遮挡
- 地下、水下、室内等环境下天基PNT服务必将中断（已经开启室内外一体化导航定位研究甚至水下定位）

5. 综合PNT系统（北斗+）

■ 从深空到水下立体PNT信息源（个人设想）





5. 综合PNT系统（北斗+）

■ 综合PNT组成

- **综合PNT定义：**基于不同原理、多种信息源形成从深海到深空的全覆盖定位、导航、授时网络，经过云平台控制、多传感器高度集成和多源数据融合，生成时空基准统一的、且具有抗干扰、防欺骗、稳健、可用、连续、可靠的PNT服务信息（我的定义）
- **综合PNT组成：**综合PNT由基础设施部分和集成PNT应用终端组成
- **综合PNT基础设施：**提供空天地海无缝PNT信息源
- **集成化PNT终端（微PNT终端）：**提供智能化信号接收与处理

5. 综合PNT系统（北斗+）

■ 综合PNT信息源



5. 综合PNT系统（北斗+）

■ 综合PNT基础设施与终端



5. 综合PNT系统（北斗+）

综合PNT基础设施与终端





6. 结束语

- 北斗2号系统取得了丰富的应用成果，为北斗全球系统建设积累了经验
- 北斗三号试验系统试验内容全面，成果丰富
- 北斗三号试验系统信号性能明显优于北斗二号系统
- 多径效应、伪距噪声都有较大幅度改善
- 卫星钟性能的提升，支撑了测距
- 星间链路体制有力支撑了高精度卫星轨道和卫星钟差测定与预报
- 高起点的基础之上建设的北斗三号一定会全面提升中国全球PNT的保障水平

6. 结束语

- 北斗三号系统之后，应着力建设综合PNT体系——

