

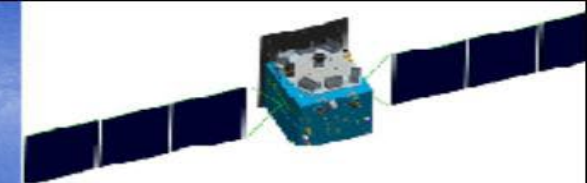
X射线天文学60周年及中国X射线天文研究

脉冲星应用进展与未来发展的思考

报告人：郑世界

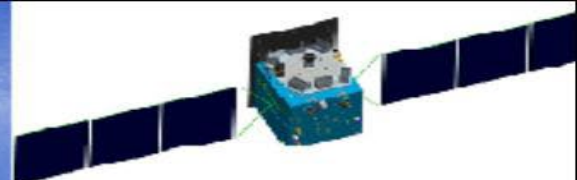
中国科学院高能物理研究所

2022.6.18



提 纲

- 研究背景
- 重要进展
- 未来发展的思考及下一步研究计划
- 总结



Baidu 百度

脉冲星导航

网页

资讯

图片

贴吧

知道

视频

文库

地图

百度为您找到相关结果约3,680,000个

搜索工具

Google

pulsar navigation

全部

图片

地图

视频

更多

工具

找到约23,500,000条结果 (用时 0.42 秒)

refereed non refereed

60

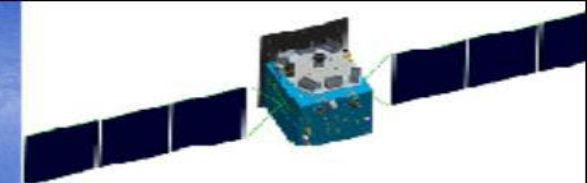
40

20

1974-1977
1978-1981
1982-1985
1986-1989
1990-1993
1994-1997
1998-2001
2002-2005
2006-2009
2010-2013
2014-2017
2018-2021
2022

ADS检索，提到“pulsar navigation”的论文数量

全方位的时空基准需求



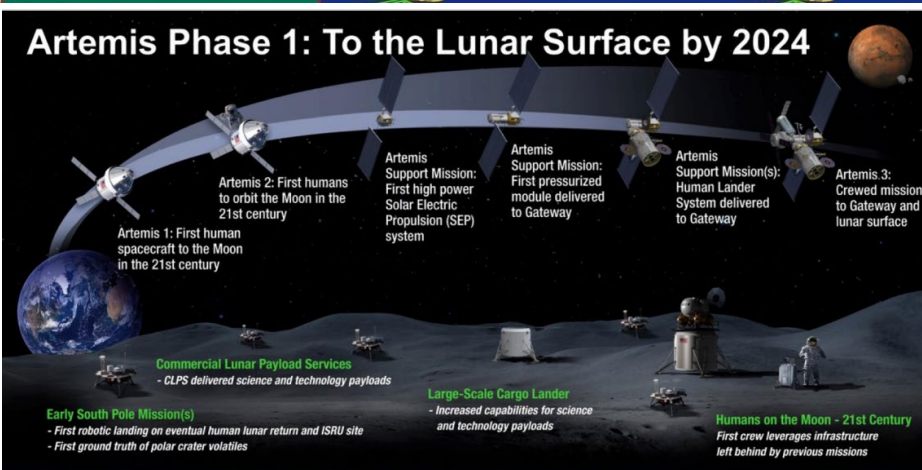
综合PNT系统（北斗+）

从深空到水下立体PNT信息源（个人设想）



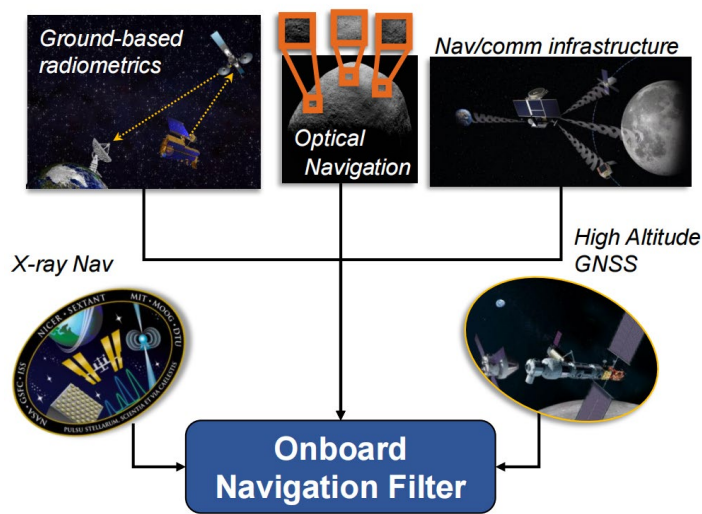
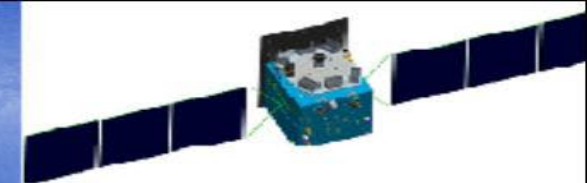
美国、欧洲、中国等都开始筹建国家PNT体系
(地面+空间)

- **P**ositioning: 定位
- **N**avigation: 导航
- **T**iming: 守时/授时

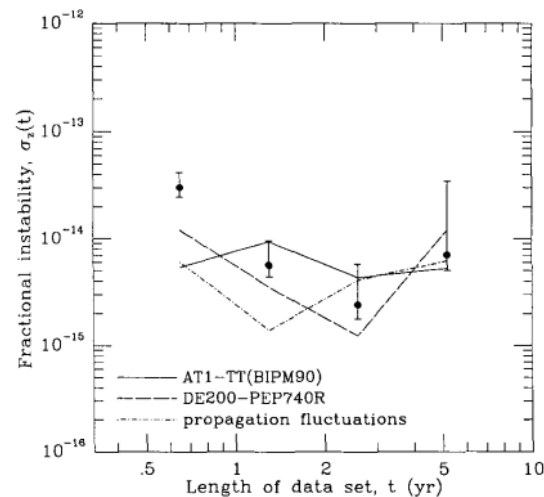


Global positioning system
-> Galactic positioning system

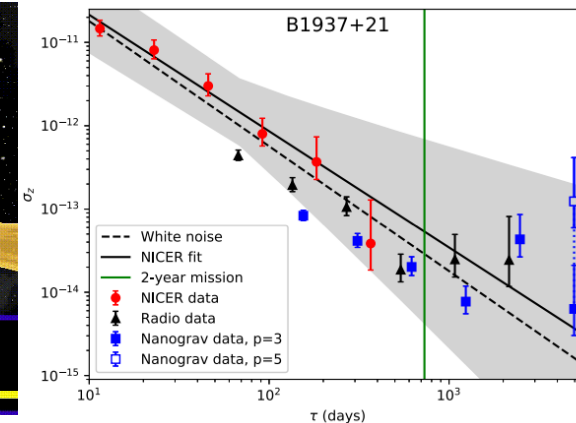
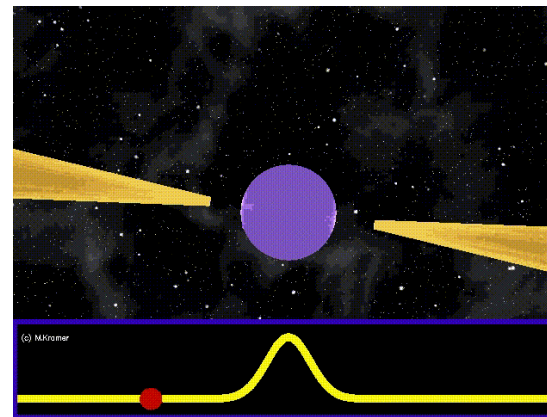
脉冲星导航&守时的需求



- GNSS
- Nav & comm infrastructure (lunar surface, Gateway, orbital)
- Ground-based tracking
- Optical navigation
- **X-ray pulsar navigation**
- LIDAR, radar
- Other sources (signals of opportunity, etc.)



Taylor, proceedings of the IEEE, 79, 1054, 1991



J. S. Deneva, et al APJ, 874, 160, 2019

脉冲星：自然界最稳定的时钟，“宇宙灯塔”、“天然的导航卫星”

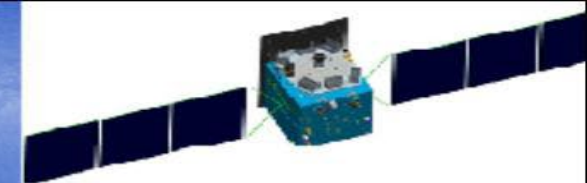
脉冲星导航的主要优势：

- 提供独立、自主的信息，可观测性好
- 可同时实现对“时空”基准的建立

可能的应用方向：重要的补充、备份手段

- 自主导航：为深空飞行器提供自主导航/建立空间“锚点”
- 自主守时：为PNT及深空提供时间基准

脉冲星导航发展概况



- 1962年6月18日，第一次看到了太阳系外的X射线源，标志着X射线天文学的诞生
- 1967年，第一颗脉冲星被发现（射电波段）；
- 1974年，美国喷气动力实验室（JPL）的Downs首次提出射电脉冲星导航；
- 1981年，Chester和Butman提出X射线脉冲星导航；
- 1999年，美国在ARGOS卫星上进行USA实验，初步验证空间X射线源进行导航的可行性；
- 2004年，美国DARPA提出了XNAV计划；
- 2004年6月欧空局已完成”依靠脉冲星计时信息的空间飞行器导航系统的可行性研究”，认为实现在轨导航的可行性不高。
- 2006年，NASA的小型企业创新研究计划（SBIR）资助进行了脉冲星导航研究；
- 2010年，美国国防高级研究计划局发表白皮书，提出了XTIM X射线望远镜的概念及应用；
- 2015年，德国马普地外所的Werner Becker教授组织召开了“自主飞行器导航”会议；
- 2016年9月15日，POLAR（伽马暴偏振探测器）随天宫二号升空，完成中国第一次空间导航实验；
- 2016年11月10日，中国试验星XPNAV-01发射升空，随后开展了导航实验。
- 2017年6月3日，NASA把中子星内部成分探索者（NICER）放到了国际空间站，其SEXTANT 开展了脉冲星导航在轨试验；
- 2017年6月15日，慧眼卫星（HXMT）发射升空，开展导航实验。

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION

Technical Report 32-1594

Interplanetary Navigation Using Pulsating Radio Sources

G. S. Downs

(NASA-CR-140398) INTERPLANETARY
NAVIGATION USING PULSATING RADIO SOURCES
(Jet Propulsion Lab.) 16 1 HC \$4.10

H74-34150

CSCL 17G

Unclass

63/21 49655



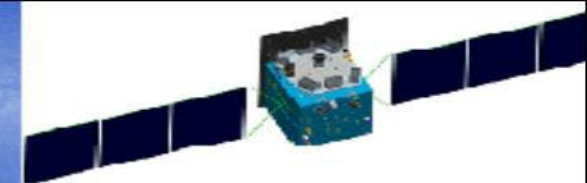
JET PROPULSION LABORATORY
CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY
PASADENA, CALIFORNIA

October 1, 1974

首次提出脉冲星导航 (NASA, 1974)

TDA Progress Report 42-63

March and April 1981



Navigation Using X-Ray Pulsars

T. J. Chester and S. A. Butman
Communications Systems Research Section

Navigation using X-ray pulsars is a practical method that yields three-dimensional positions accurate to ~ 150 km with one day of data. It is the best practical method for sufficiently distant spacecraft, requiring only a small X-ray detector on board the spacecraft coupled with an Earth-orbiting satellite that provides the arrival of X-ray pulses at Earth. (In the last decade, there has been an average of several such satellites in orbit at any given time.)

X射线脉冲星导航 (NASA, 1981)



Comparison of Deep Space Navigation Using Optical Imaging, Pulsar Time-of-Arrival Tracking, and/or Radiometric Tracking

Todd Ely¹ · Shyam Bhaskaran¹ · Nicholas Bradley¹ · T. Joseph W. Lazio¹ · Tomas Martin-Mur¹

Accepted: 1 October 2021

© The Author(s) 2021

Abstract

Recent advances with space navigation technologies developed by NASA in space-based atomic clocks and pulsar X-ray navigation, combined with past successes in autonomous navigation using optical imaging, brings to the forefront the need to compare space navigation using optical, radiometric, and pulsar-based measurements using a common set of assumptions and techniques. This review article examines these navigation data types in two different ways. First, a simplified deep space orbit determination problem is posed that captures key features of the dynamics and geometry, and then each data type is characterized for its ability to solve for the orbit. The data types are compared and contrasted using a semi-analytical approach with geometric dilution of precision techniques. The results provide useful parametric insights into the strengths of each data type. In the second part of the paper, a high-fidelity, Monte Carlo simulation of a Mars cruise, approach, and entry navigation problem is studied. The results found complement the semi-analytic results in the first part, and illustrate specific issues such as each data type's quantitative impact on solution accuracy and their ability to support autonomous delivery to a planet.

Keywords Space navigation · Orbit determination · Radiometric tracking · Optical navigation · Pulsar time-of-arrival

Summary: the authors of this study believe that the complexity involved at the spacecraft is rather involved. Although pulsar positioning has been shown to be possible, issues of complexity and latency in obtaining position estimates cannot be overcome by fast autonomous positioning. Rather, such a positioning system appears to be required for spacecraft or for hub stations providing telecommunication and location services.

Navigation System relying on Pulsar Timing Information

Final Report

Authors: Josep Sala¹, Andreu Urruela¹, Xavier Villares¹, Robert Estalella², Josep M. Paredes²

Affiliation: ¹Dpt. of Signal Theory and communications, Universitat Politècnica de Catalunya, ²Dpt. of Astronomy and Meteorology, Universitat de Barcelona

ACT Researcher(s): Torsten Bondo, Andreas Rathke

Contacts:

Josep Sala
Tel: +34-93-4015894
Fax: +34-93-4016447
e-mail: alvarez@gps.tsc.upc.es

Leopold Summerer
Tel: +31(0)71565 – 5174
Fax: +31(0)71565 – 8018
e-mail: act@esa.int



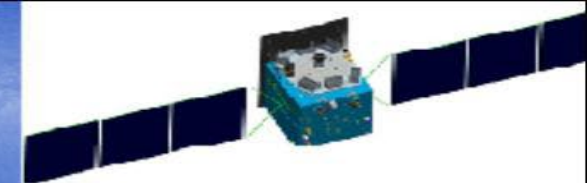
Available on the ACT website
<http://www.esa.int/act>

Ariadna ID: 03/4202
Study Duration: 2 months
Contract Number: 18148/04/NL/MV

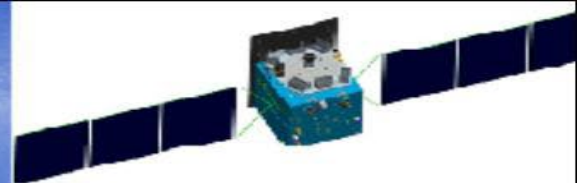
对小型卫星只存在理论

- 脉冲星流量低
- 探测器很难小型化
- 积分时间长
- 对卫星平台要求高

美国JPL实验室

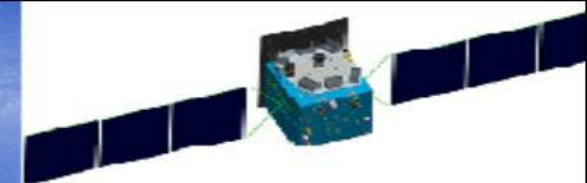


- 863、基金委、科工局、中科院、总参（战支）、总装（装发）、航天五院等多方面支持研究。
- 西安测绘所，国防科技大学，西安电子科技大学，装甲兵工程学院，中科院西安光机所、授时中心、国家天文台、高能所、上海天文台，航天五院等单位进行了相关理论和算法研究，每年都有大量论文发表；
- 五院502、508（南京大学、北方夜视）、513（西光所、空间中心），高能所，国家天文台进行了X射线探测器等的研究。
- 北斗二代导航系统支持了脉冲星导航理论、总体技术攻关、探测器研制、地面验证系统、XPNAV-1的部分工作。

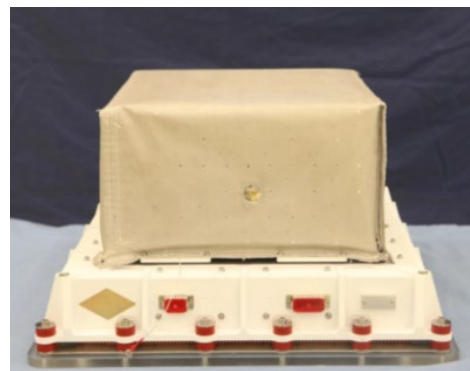


脉冲星导航重要进展

脉冲星导航的重要空间试验



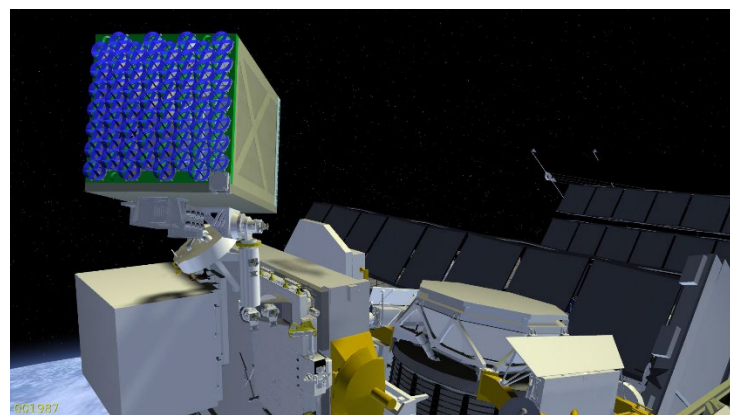
Argos卫星上的USA试验
(美国, 1999)



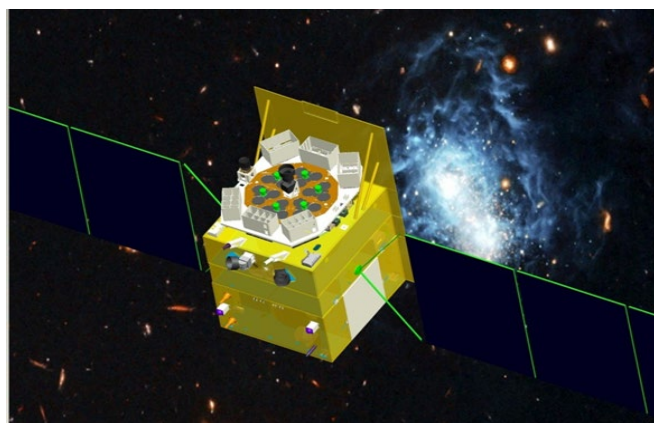
天宫二号空间实验室, POLAR
(中国, 2016)



XPNAV-1
(中国, 2016)



国际空间站, NICER/SEXTANT
(美国, 2017)

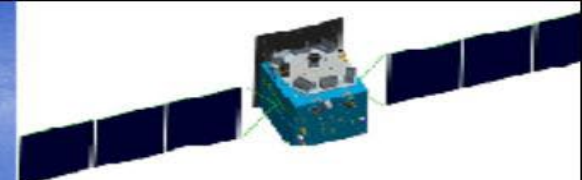


慧眼-HXMT
(中国, 2017)



怀柔一号
(中国, 2020)

脉冲星导航的重要空间试验



核心指标	POLAR（科学院） 2016.9	XPNAV-1（五院） 2016.11	NICER（NASA） 2017.4	慧眼（科学院） 2017.6
X射线能区	50 ~ 500 keV	0.5 ~ 10 keV	0.2 ~ 12 keV	1-250 keV
有效探测面积	200 cm ²	2.4 cm ² @1.5 keV	1008cm ² @4.5 keV 1793 cm ² @1.5 keV	LE:300cm ² @1keV ME:500cm ² @10keV HE:3100cm ² @30keV
脉冲星观测颗数	1颗（脉冲星不是其既定目标）	1颗脉冲星	4颗毫秒脉冲星	3颗脉冲星
导航定位精度	13.1km (3σ)	38.4km (rms)	< 16 km RSS 0.5 天 < 4.82 km RSS 4 天	<10km (3σ)
参考文献	中国科学,47,099505(2017)	J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 5, 1 (2019)	AcAau.176. 531(2020)	APJS 244, 1 (2019)
收敛时间	非实时，地面拟合	非实时、地面拟合	实时在轨生成	非实时，地面拟合

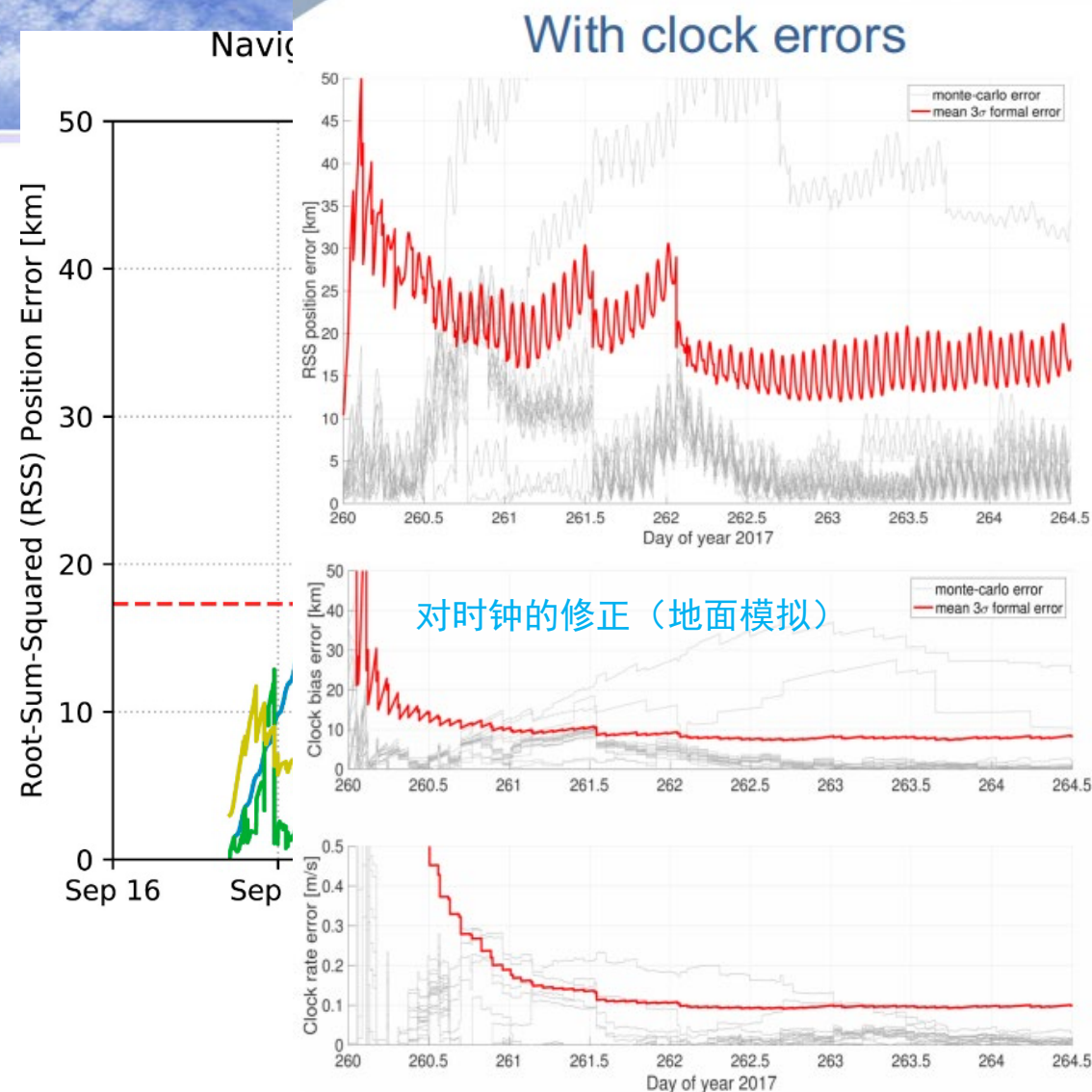


Keith Gendreau (PI of NICER): “We think it’s **a big deal**. It’s a **great way** to apply some of our astrophysics to exploration goals that include going into the outer Solar System and beyond.”

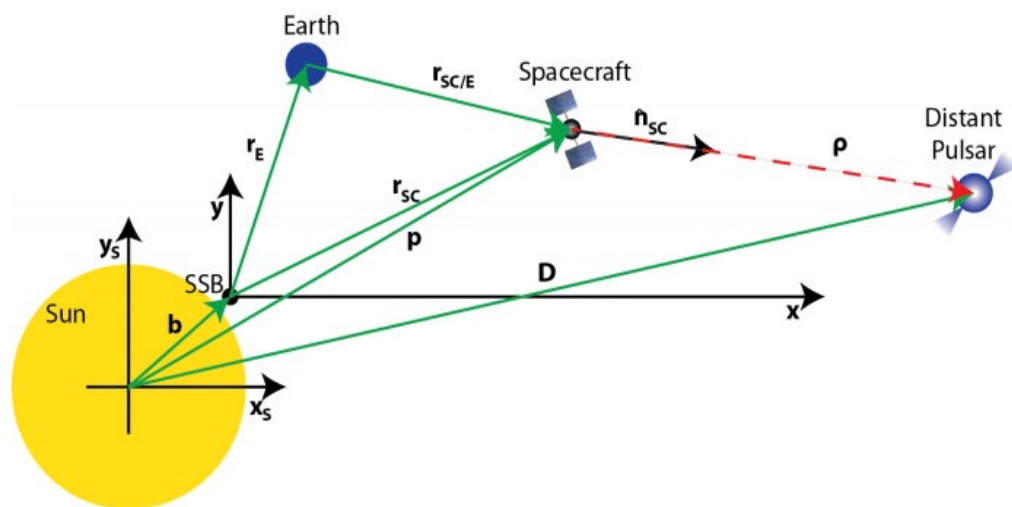
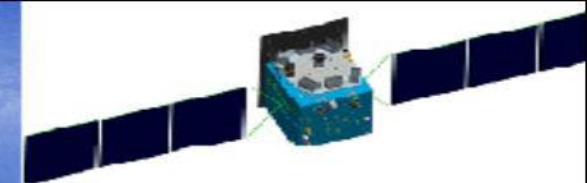


Jason Mitchell (SEXTANT Project Manager): “This demonstration **is a breakthrough for future deep space exploration**. As the first to demonstrate X-ray navigation fully autonomously and in real-time in space, **we are now leading the way**.”

2019年5月29日，NASA在空间通讯上发表“NASA Navigation Tech Shows Timing Really Is Everything”，表示会将脉冲星导航技术用于“**重返月球计划**”以及之后的**火星探测**中。



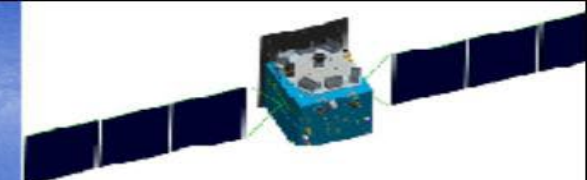
脉冲星导航算法



- 理想的脉冲星发出周期稳定的脉冲信号。由于太阳系质心与脉冲星之间的相对运动速度恒定不变，因此每一个脉冲达到太阳系质心的间隔都是恒定的。
- 航天器处于太阳系质心坐标系中不同位置时，同一个脉冲达到航天器和到达太阳系质心的时间会不一样；

- 通过分析航天器接收到的（不同方向）脉冲星脉冲信号的特点，就可以得到航天器在太阳系质心坐标系之中的三维位置（或运动轨道）。
- 由于脉冲星的X射线脉冲信号非常弱，不可能像GPS或者北斗一样实现瞬时的导航
- 需要观测很长时间（如1000秒），才能得到一个有足够高信噪比的脉冲轮廓，因此脉冲星导航需要结合航天器的轨道模型，才能进行导航（定轨）。

(1) 基于卡尔曼滤波的导航算法

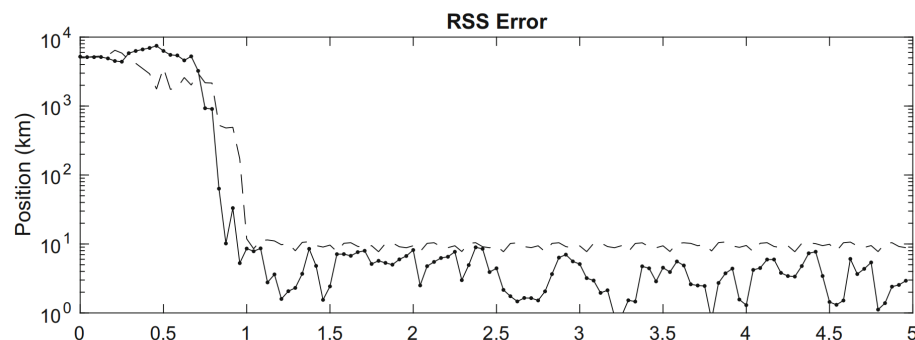


➤ 扩展卡尔曼滤波 (EKF)

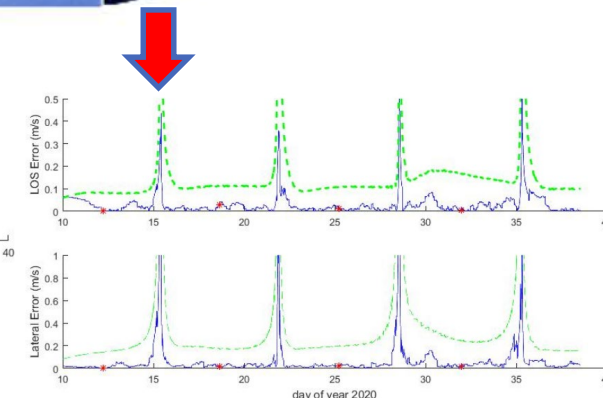
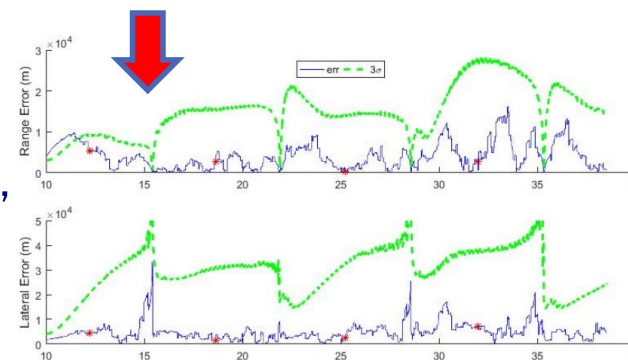
NASA SEXTANT Mission Operations Architecture,
AcAau. 176. 531 (2020)

刘江凯, 博士论文“地月空间DRO 航天器自主导航仿真研究”等

➤ 粒子卡尔曼滤波 (PKF)



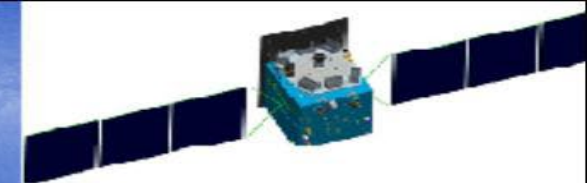
Aspects of Pulsar Navigation for Deep Space
Mission Applications” Po-Ting Chen,
2020JAnSc..67..704C



主要特点:

- ◆ 成熟度高, 易于实现; (NICER在轨实现)
- ◆ 轨道非线性问题;
- ◆ 步长不易太长

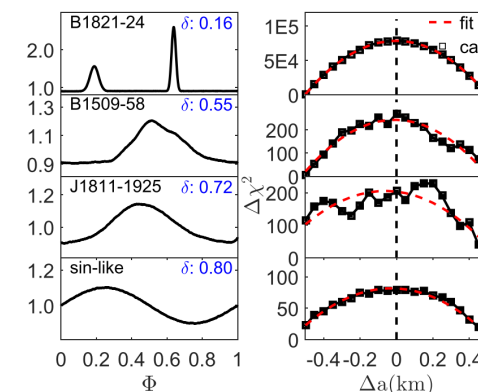
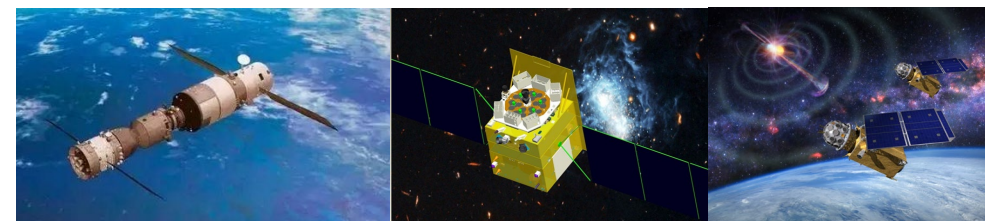
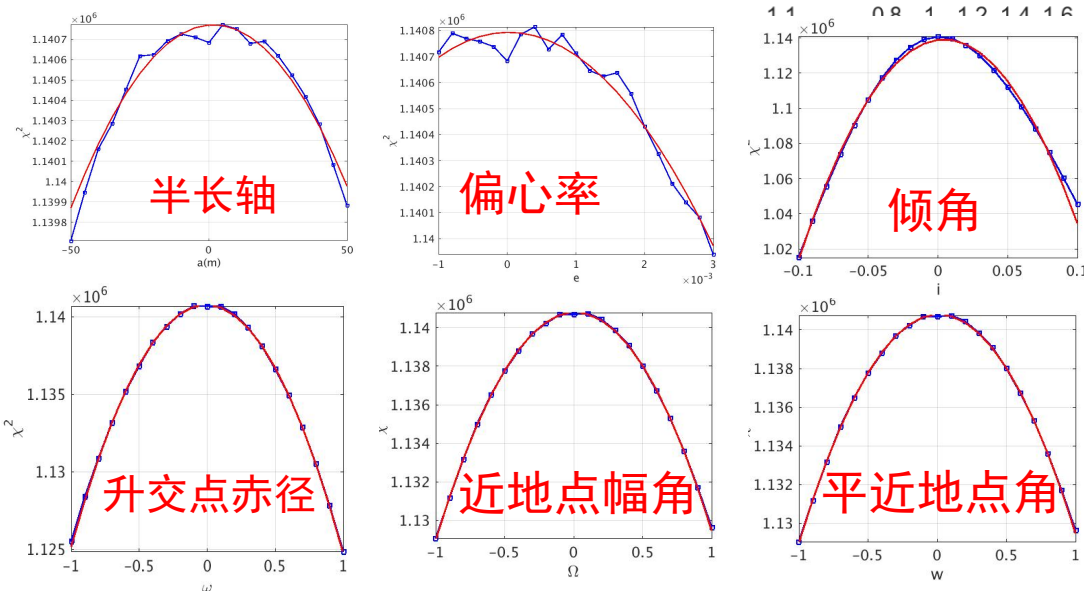
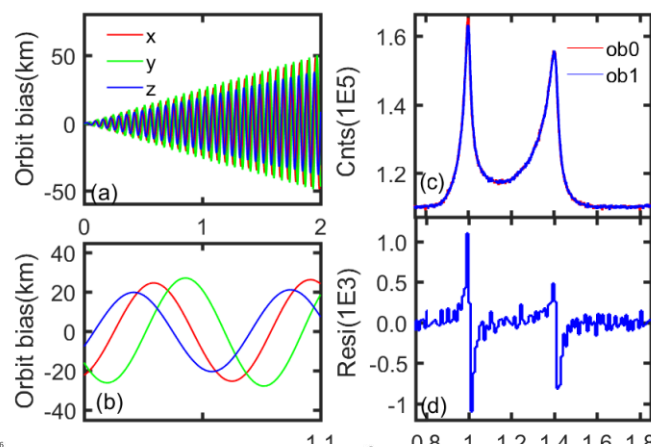
(2) 脉冲轮廓显著性关联分析



定义脉冲轮廓的显著性

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(P(\phi_i) - \bar{P})^2}{\bar{P}}$$

轨道发生偏移后,
 χ^2 下降

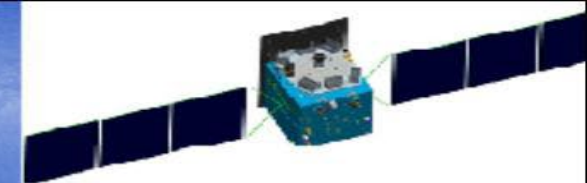


主要特点:

- ◆ 实现“单脉冲星”导航;
- ◆ 导航的“观测量”由“观测脉冲轮廓的显著性”取代了“脉冲ToA”，不再依赖输入的“标准轮廓”，不受不同探测器的参数影响;
- ◆ 适合窄视场/大视场、积分时间长等情况;
- ◆ 计算量大，需做在轨优化.

蓝线：脉冲轮廓的 χ^2 量随轨道根数的变化 红线：最优值拟合

(3) 基于在轨计时的导航算法



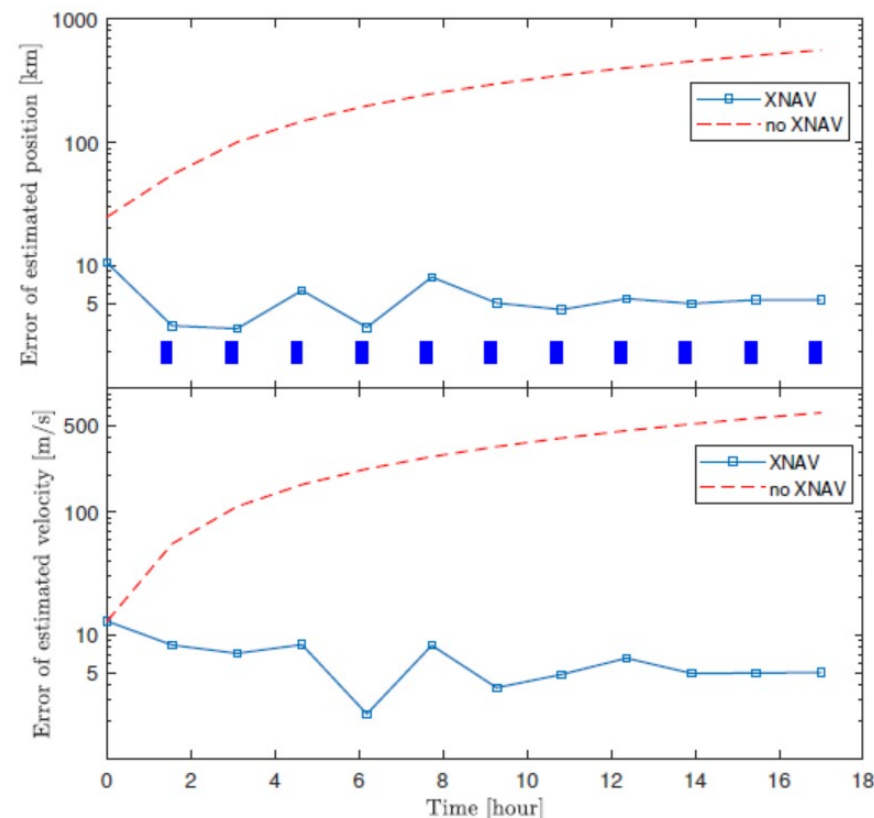
光子到达时间记 $\{t_i\}_{i=1}^N$

$$\phi(t_i) = \phi_0 + v_0 [g(t_i) - g(t_0)] + \frac{1}{2} \dot{v}_0 [g(t_i) - g(t_0)]^2 + \frac{1}{6} \ddot{v}_0 [g(t_i) - g(t_0)]^3$$

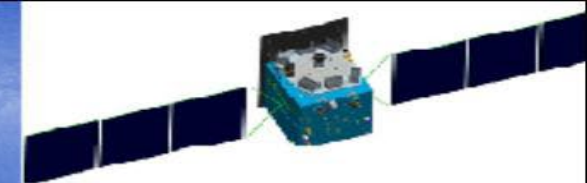
$$\phi(t_i) = \tilde{\phi}(t_i) + \tilde{v}(t_i) \frac{dg(t_i)}{dr_{SSB}(t_i)} \delta r_{SSB}(t_i)$$

$$\phi(t_i) = \tilde{\phi}(t_i) + \bar{v}_1 (t_i - t_0) + \bar{v}_2 (t_i - t_0)^2$$

- 1: **Initial Condition:** There is a series of recorded photon events, $\{t_i\}_{i=1}^N$, initial position and velocity of satellite at t_0 , $\tilde{r}_{SSB}(t_0)$ and $\tilde{v}_{SSB}(t_0)$.
- 2: **Step 1:** Obtain $\tilde{r}_{SSB}(t_i)$ and $\tilde{v}_{SSB}(t_i)$ by propagating the orbit dynamics model of satellite.
- 3: **Step 2:** Perform (III) to every element in $\{t_i\}_{i=1}^N$ using $\tilde{r}_{SSB}(t_i)$ and $\tilde{v}_{SSB}(t_i)$, and obtain the corrected photon events, $\{\bar{t}_i\}_{i=1}^N$.
- 4: **Step 3:** Divide $\{\bar{t}_i\}_{i=1}^N$ into 6 parts.
- 5: **Step 4:** Calculate the pulse arrival times (ToAs) at the initial time of each part.
- 6: **Step 5:** Fit the new timing model using the 6 ToAs and obtain $\bar{v}_1$ and $\bar{v}_2$.
- 7: **Step 6:** Update the 6 ToAs using estimated $\bar{v}_1$, $\bar{v}_2$.
- 8: **Step 7:** Update $\tilde{r}_{SSB}(t_0)$ and $\tilde{v}_{SSB}(t_0)$ when the updated 6 ToAs are employed and when the batch orbit determination method is employed.
- 9: **Step 8:** If $\tilde{r}_{SSB}(t_0)$ and $\tilde{v}_{SSB}(t_0)$ converge, this algorithm ends. Otherwise, go back to the Step 1.



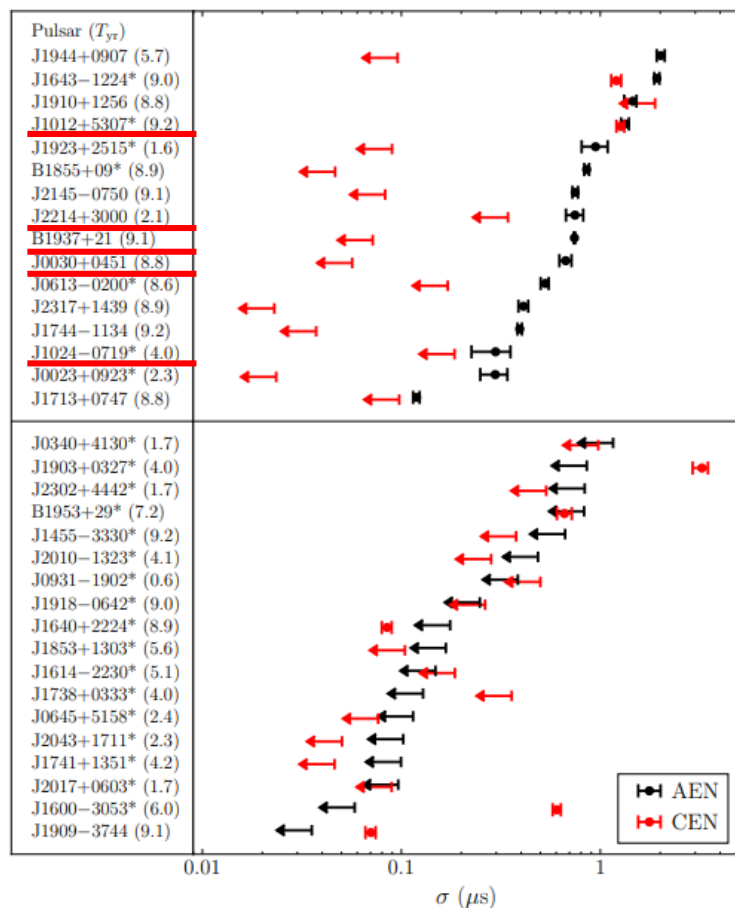
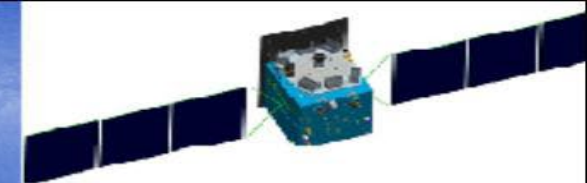
Wang, YD, 论文审稿中



脉冲星导航+守时服务从可行性迈向应用！

- 脉冲星数据积累及特性研究
- 新型导航探测器优化设计与研制
- 从地面验证->在轨自主实现
- 真实应用场景的验证

(1) 脉冲星观测数据积累及特性研究



1) 开展脉冲星时间噪声的研究

- 对毫秒脉冲星：红噪声仍然制约着脉冲星ToA的测量精度；
- 对年轻脉冲星(Crab) ~潜在的重要的导航脉冲星
流量大、便于较小的探测器短时间可获得较大的测量精度
时间噪声大

Gao, Xu-Dong; Zhang, Shuang-Nan, et al. 2016, MNRAS

A. Parthasarathy, et al, 2019, MNRAS

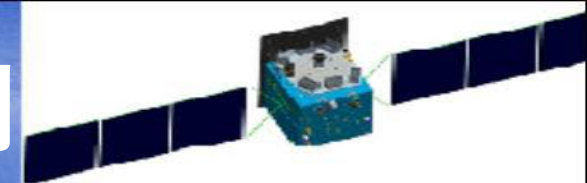
M. Lower, et al, 2020, MNRAS

o o o o o o

2) 可用的守时脉冲星搜寻与验证

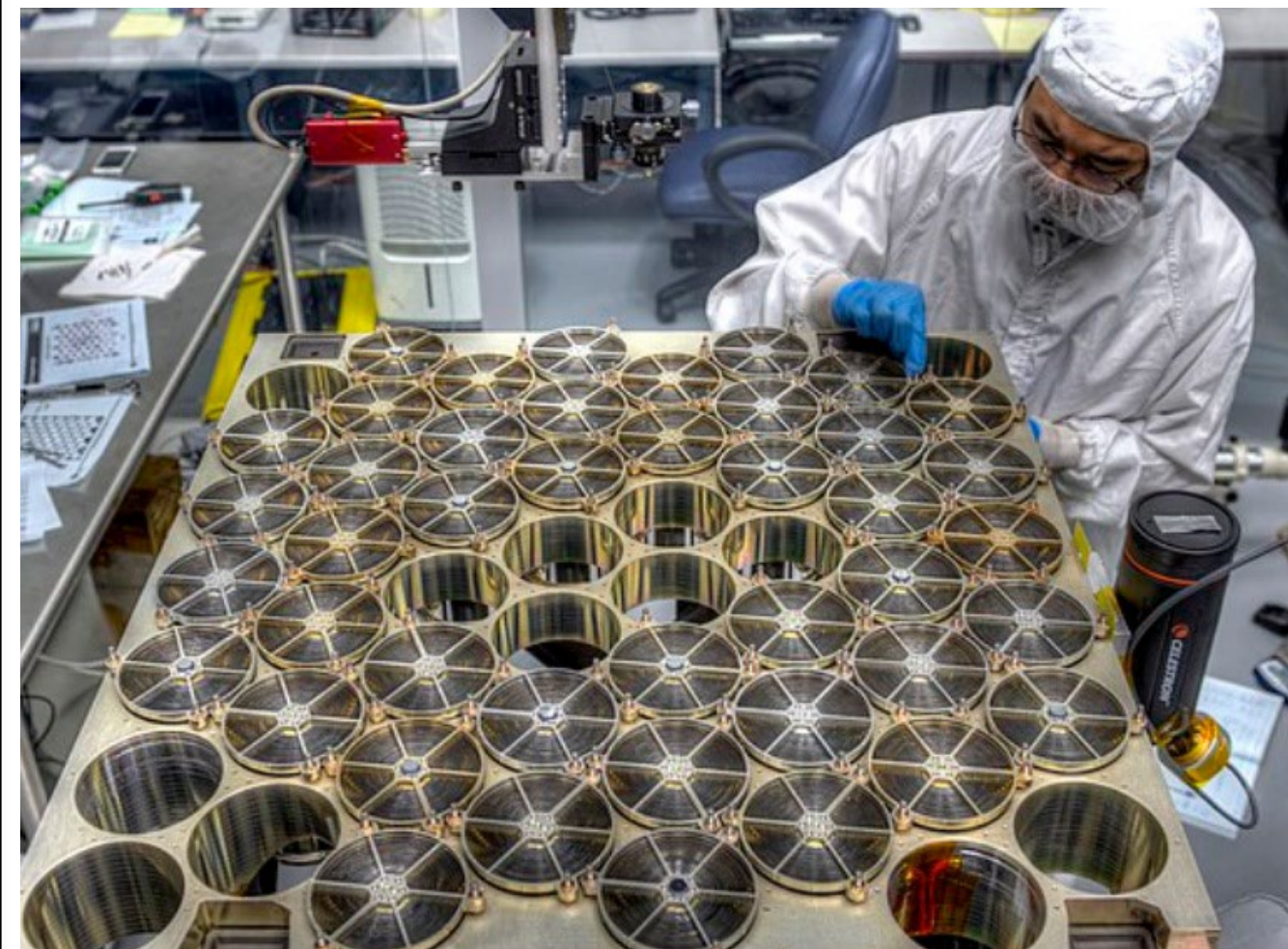
T. Dolch et al, 2018, JPHCS

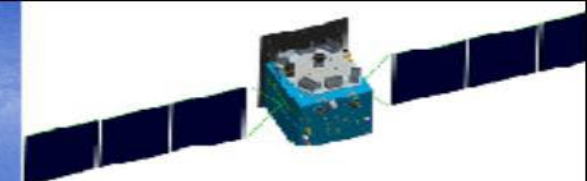
(2) 新型导航探测器的优化设计与研制



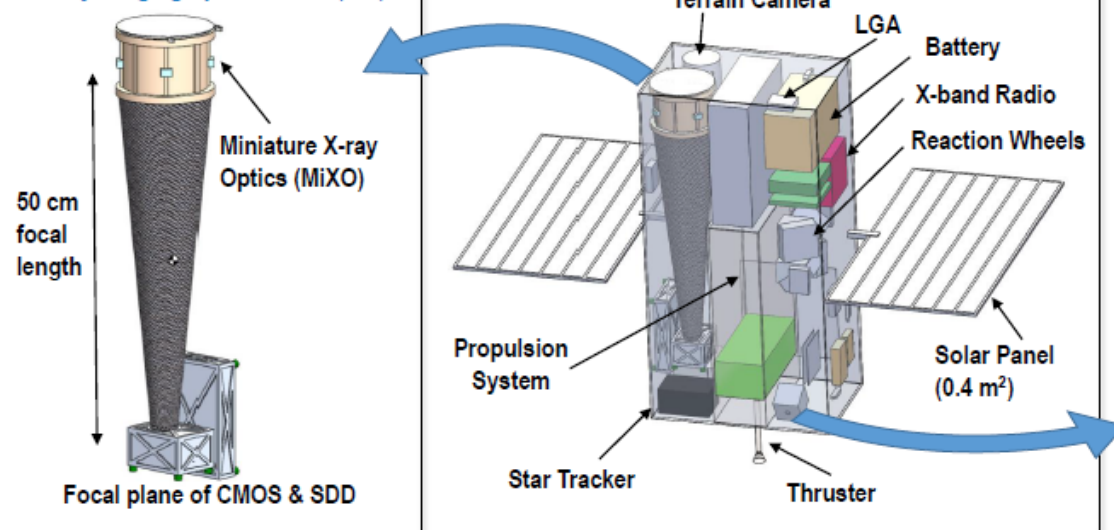
- 小型化，轻量化
- 抑制本底，提高探测能力

“NICER is roughly **the size of a washing-machine**” Jason Mitchell
(SEXTANT Project Manager)





X-ray Imaging Spectrometer (XIS)



- ~6U CubeSat X-ray Telescope: 5.8 kg with 8.6W (S/C: ~40U)

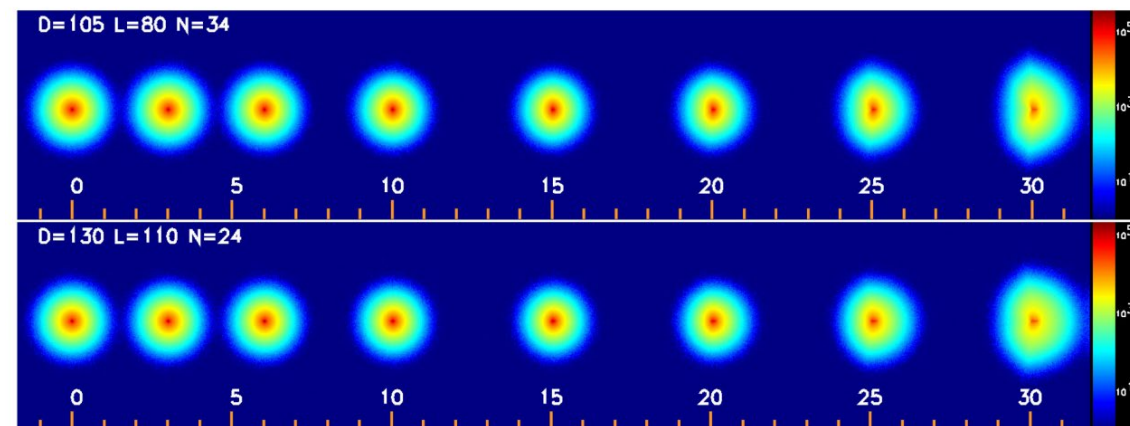
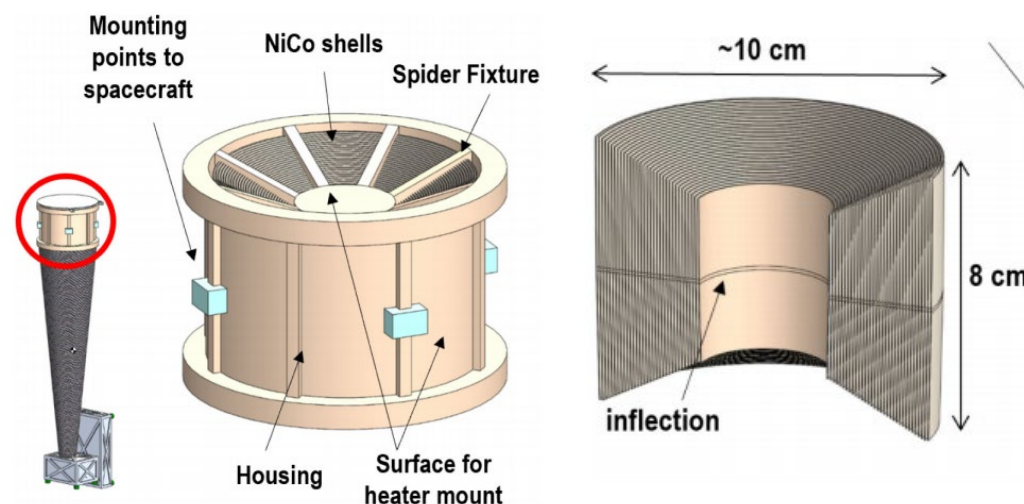
CubeX (美国, 2023-2027)

科学目标:

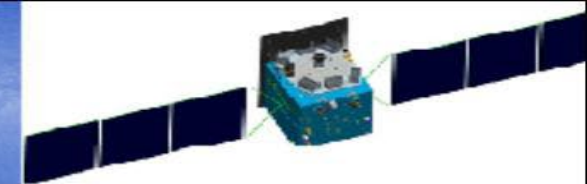
深空中的脉冲星导航实验;

通过月球荧光光线研究月亮及月幔

Miniature X-ray Optics (MiXO)

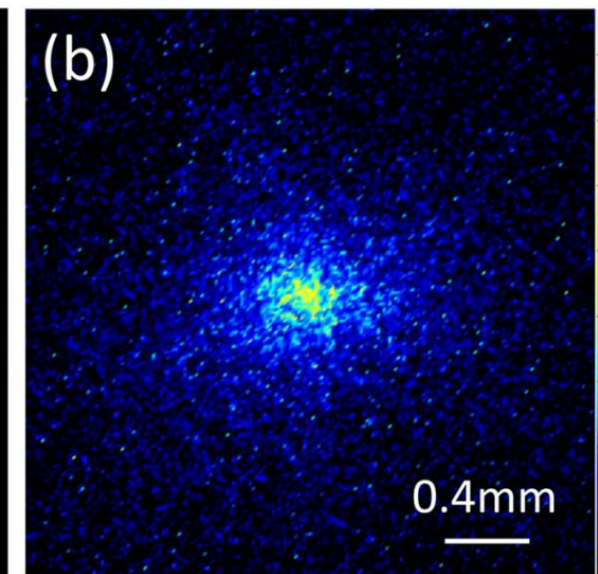
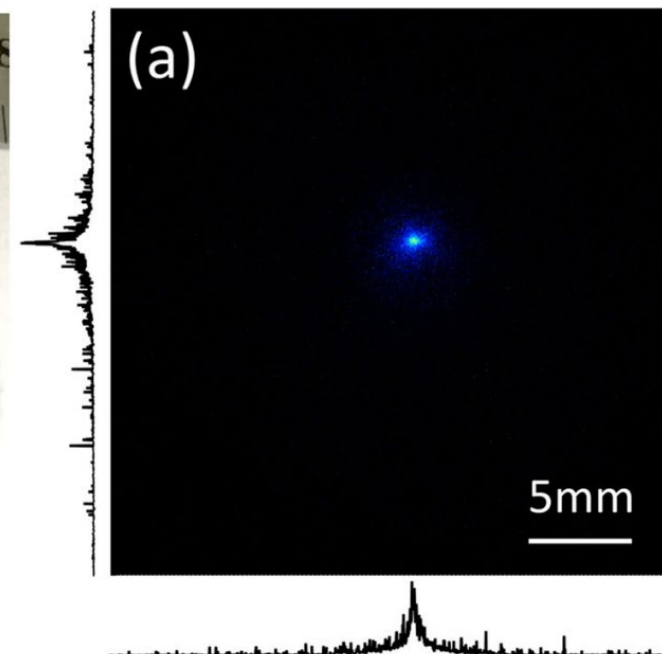
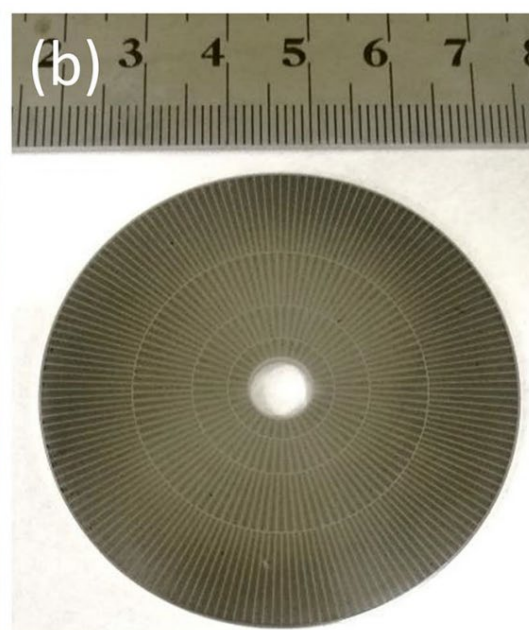
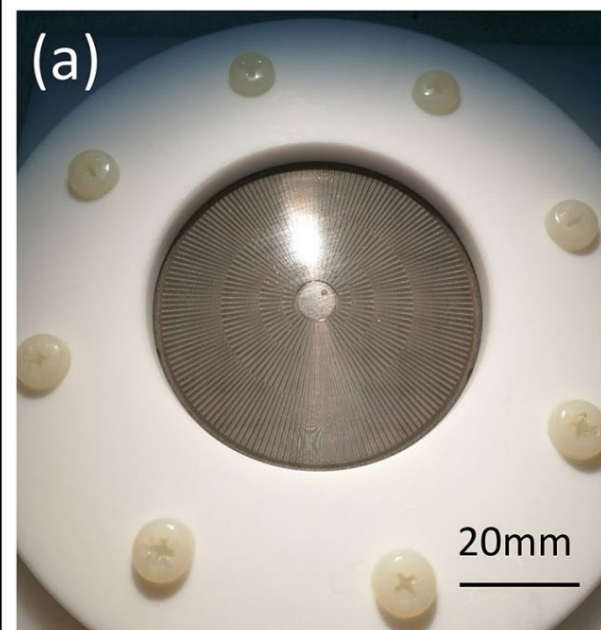


Vinay L. Kashyap, 2020, applied optics



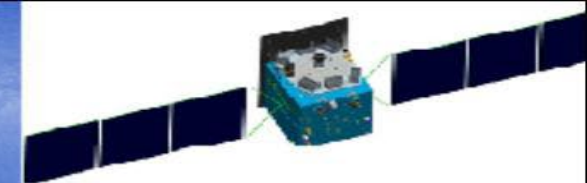
微槽光学:

MSO (micro-slot optics) , 优点: 易小型化, 轻量化



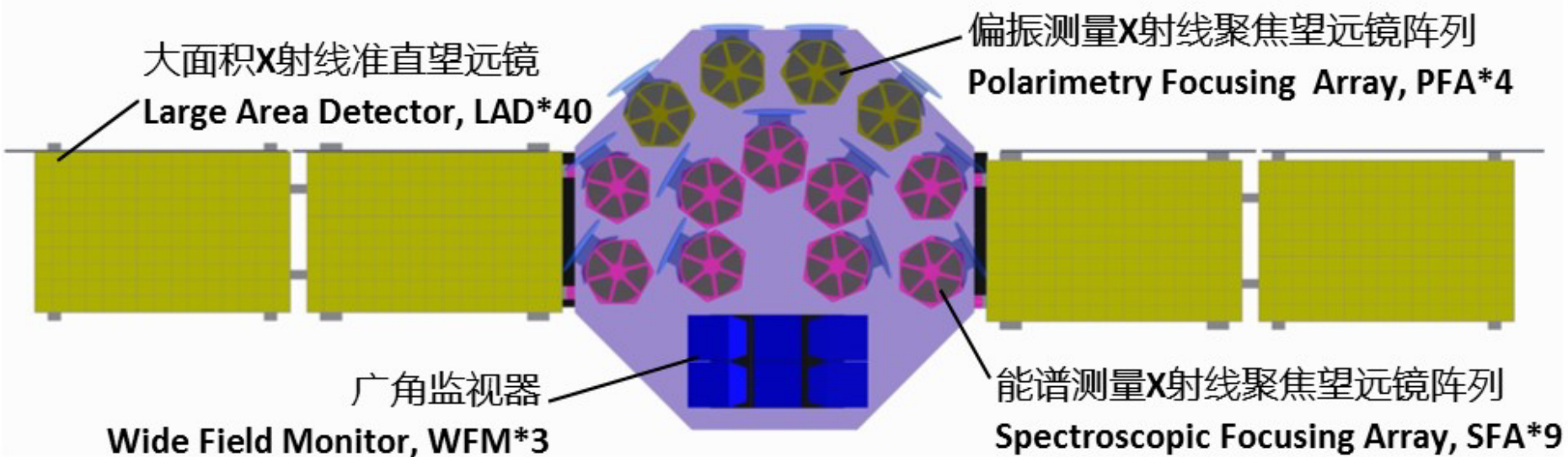
Tianchong Zhang, 2021, Microsystem Technologies

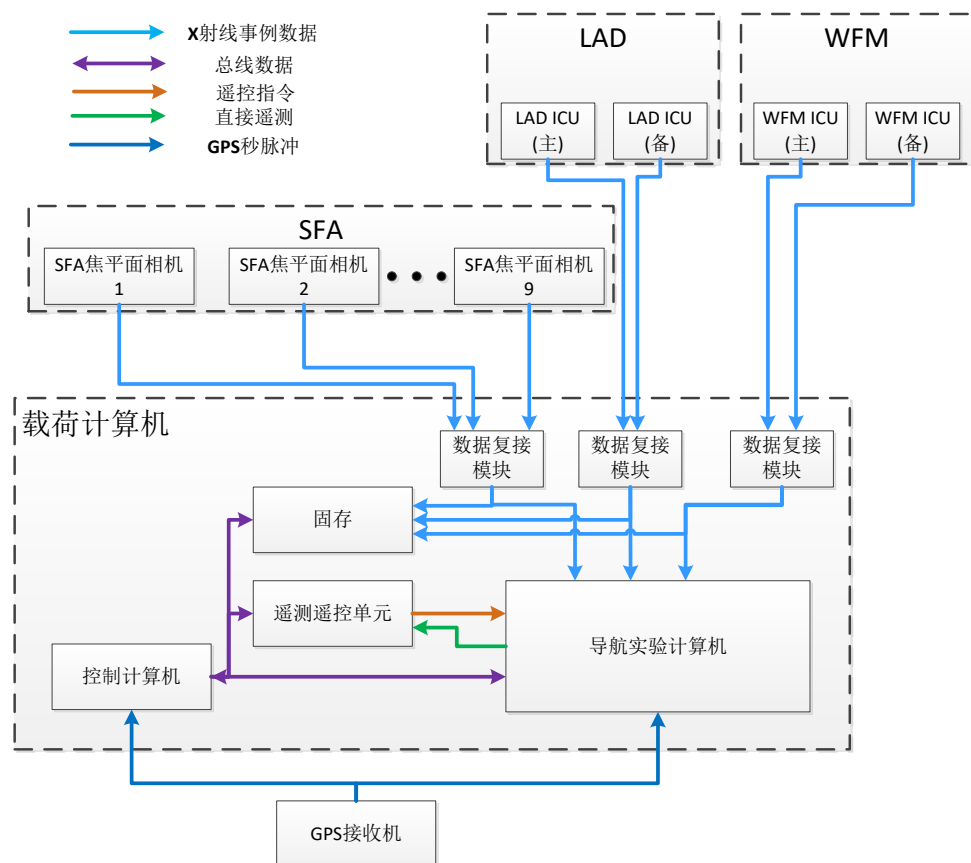
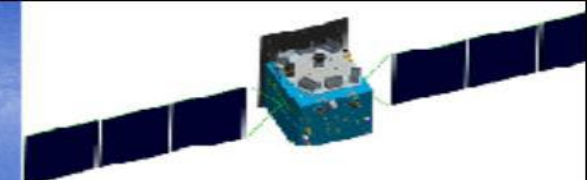
(3) 在轨导航实现



搭载试验

- 在轨实时定轨实验；
- 基于星上原子钟时间系统的时间修正实验
(脱离GPS)



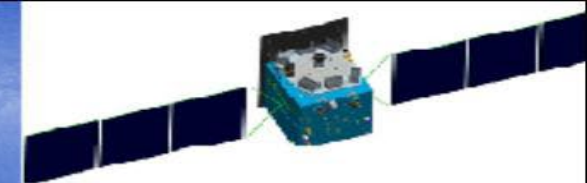


初步设计

脉冲星	周期 (ms)	SFA流量估计 (cnts/s)	脉宽比例 (100%)	ToO达到 $3\mu\text{s}$ 时的 时间估计
Crab	33.	56000	5.00%	0.8s
B1821-24	3.0540	0.452	1.86%	1.5ks
B1937+21	1.5580	0.276	2.59%	2.2ks
J0218+4232	2.3230	0.328	11.20%	19ks
J0030+0451	4.8650	0.772	15.00%	27ks
J0437-4715	5.7570	2.812	10.00%	187ks
J1012+5307	5.2560	0.184	28.00%	242ks
J2124-3358	4.9310	0.296	40.00%	1.4Ms
J2214+3000	3.1192	0.356	31.00%	2.5Ms
J0751+1807	3.4790	0.1	30.00%	3.5Ms

脉冲星选择

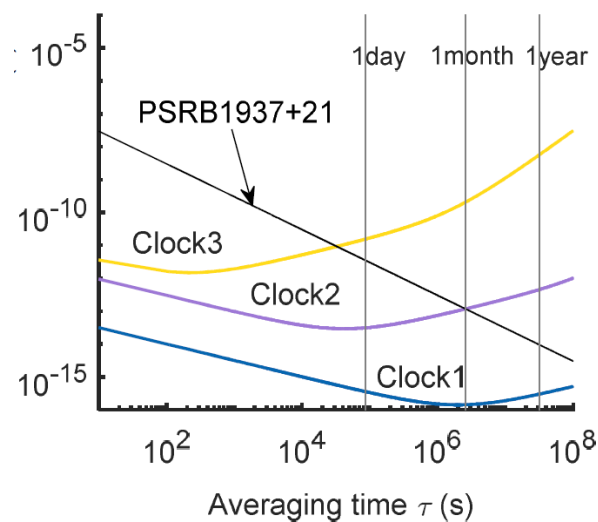
(4) 真实应用场景的验证



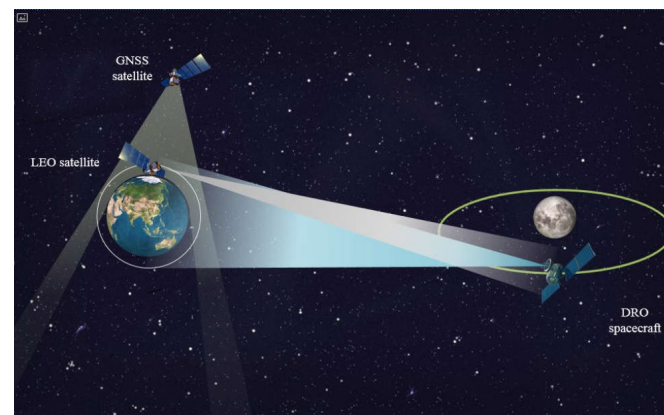
- PNT体系下的高精度时间保持
- 深空中的自主导航/时间维持



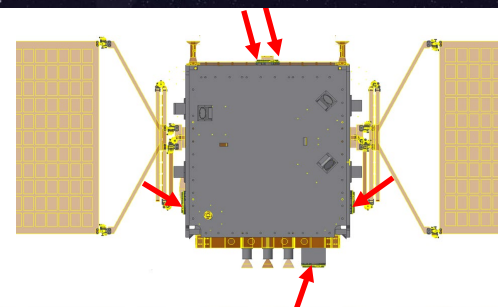
Gateway计划，美国/欧洲走向深空的门户，时间、位置基准服务

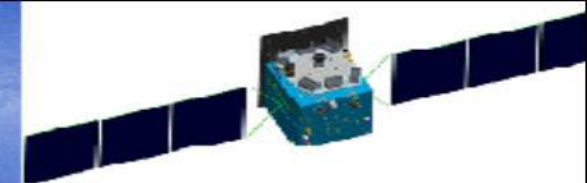


- Clock1: 地面实验室高性能氢原子钟
- Clock2: 空间超稳晶振
- Clock3: 空间常用晶振



DRO计划（中国）





- 脉冲星在轨导航和守时服务将在PNT体系及深空发挥重要作用；
- 脉冲星导航在轨实验已完成，导航精度~km量级，其技术可行性已经得到验证；
- 脉冲星导航、守时应用尚需迈入实际应用
cubeX、eXTP、Gateway、DR0...

谢谢！