# 同轴电缆支持太空中的LISA引力观测站

Lina Schmidt，SSB-Electronic GmbH；Simon Barke，University of Florida Precision Space Systems Laboratory

*专注于高频解决方案的SSB-Electronic公司正在与佛罗里达大学合作，支持精密空间系统实验室（PSSL）开展一个新的太空项目，为欧空局和NASA的激光干涉仪空间天线（LISA）太空任务开发一个特殊的电荷管理设备。SSB的同轴电缆被用于该设备的测试中。*

LISA是第一个太空引力波观测站，[1]也是欧空局“2015-2025宇宙愿景”计划中三个大型任务之一。LISA任务由欧空局领导，是欧空局、NASA和一个由20个欧空局成员国的科学家组成的国际联盟的合作项目。[2]

LISA将由三个相同的航天器组成，相隔250万公里，它们将在围绕太阳的轨道上以三角队形跟踪地球（图1）。[3]这三个航天器将通过激光束连接，形成一个具有数百万公里长激光臂的高精度激光干涉仪。与已经存在的地面引力波观测站如Geo 600、LIGO或VIRGO4相比，LISA将处理0.1mHz和1Hz之间的频率，由于臂长的限制和地面重力波动产生的地面重力梯度噪声，地球上是无法做到这个频率范围的。这些波动是由地震活动、大气干扰（如风、雨、云层移动）和人类活动（工业、繁忙的道路或火车路线）引起的。[4,5]在太空中，LISA可以避开来自地球的噪音。[1]

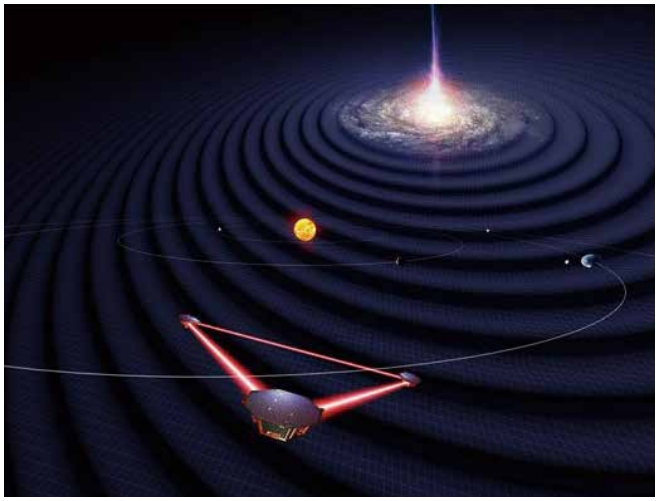


图1：LISA在轨道上部署后的艺术效果图。资料来源：佛罗里达大学。

LISA任务的目的是补充地面探测器，调查引力波频谱。[1]与地面探测器一样，LISA也是基于外差式激光干涉仪。三个LISA航天器之间来回传递激光束，信号被结合起来，以搜索来自时空扭曲的引力波特征。LISA将发现的引力波源包括超大质量黑洞合并、中子星合并和其他重大天体物理事件，如大爆炸。[3]用LISA进行的引力波探测将补充我们对宇宙的开始、演变和结构的认识。[3]

LISA任务的航天器计划于2034年发射。将用大约一年的时间到达并进入围绕太阳的轨道，然后将在至少8至12年的时间里收集科学数据。

## 弗罗里达大学开发电荷管理设备

由John W. Conklin和Peter Wass领导的佛罗里达大学团队与Guido Mueller教授（物理系）合作，获得了一份NASA合同，在2025年7月31日前建造并测试一个用于LISA的电荷管理设备原型（图2）。

图2：LISA电荷管理设备原型。资料来源：佛罗里达大学。

这个电荷管理系统是一个紫外线装置，可以监测三个LISA航天器内自由下落的测试块的电荷。这些测试块是由金铂合金制成的立方体，每个边缘长度为46毫米，重量为2公斤。电荷管理设备将在测试块上照射适量的紫外线，以保持其电荷为零，防止不必要的运动。[6]佛罗里达大学团队的工作是确保除了引力波之外没有任何东西会移动粒子团，而且测试块的放电不会产生任何不良的副作用。[6]

每个航天器使用两个内部测试块，每一个专门用于一个干涉测量臂。[7]每个航天器都使用高精度的外差式激光干涉仪来测量由引力波引起的测试块之间极小的距离变化（pm到nm）。三个航天器内的所有测试块将沿着航天器之间的视线自由下落，作为惯性传感器来估计位置。[4]围绕每个测试块的电容传感器将监测它们相对于航天器的位置和方向。为了使每个卫星保持在测试块的中心，微小的轨道和姿态修正将由一个

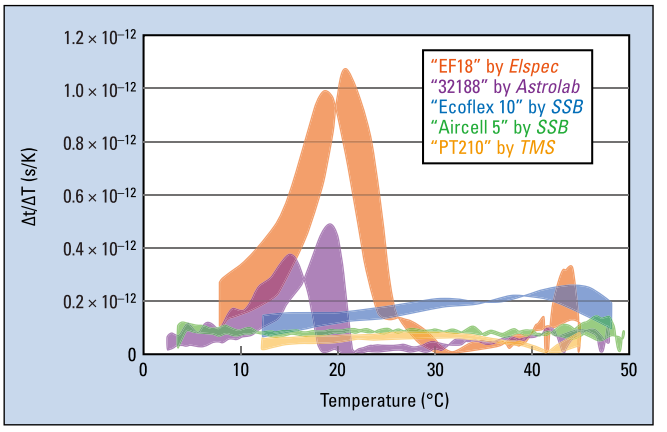



图3：五条电缆的相位稳定性。资料来源：Simon Barke.[8]

表1 测试电缆规格[8]

| Cable Name (Manufacturer) | Dielectric Material | Operating Temperature (°C) | Maximum Frequency (GHz) | VoP (%) | Δt/ΔT (s/K) |
|---|---|---|---|---|---|
| EF18 (Elspec) | Low Density PTFE | -40 to 85 | 18 | 77 | $1.2 \times 10^{-12}$ |
| 32188 (Astrolab) | Low Density PTFE | -55 to 200 | 27 | 86 | $4.9 \times 10^{-13}$ |
| Ecoflex 10 (SBB) | Low Density PE | -55 to 85 | 6 | 85 | $2.6 \times 10^{-13}$ |
| Aircell (SBB) | Low Density PE | -55 to 85 | 10 | 82 | $1.4 \times 10^{-13}$ |
| PhaseTrack 210 (TMS) | Proprietary TF4™ | -55 to 85 | 29 | 83 | $8 \times 10^{-14}$ |

无阻力姿态控制系统利用惯性传感器的测量结果来确定。这种调节卫星位置的系统能够实现新的任务，例如，在未来也将用于测量气候变化对地球的影响。LISA将用三个独立的干涉测量组合来探测引力波，这些组合是沿着三角形配置的两侧的测试块之间的光程时间测量。[7]

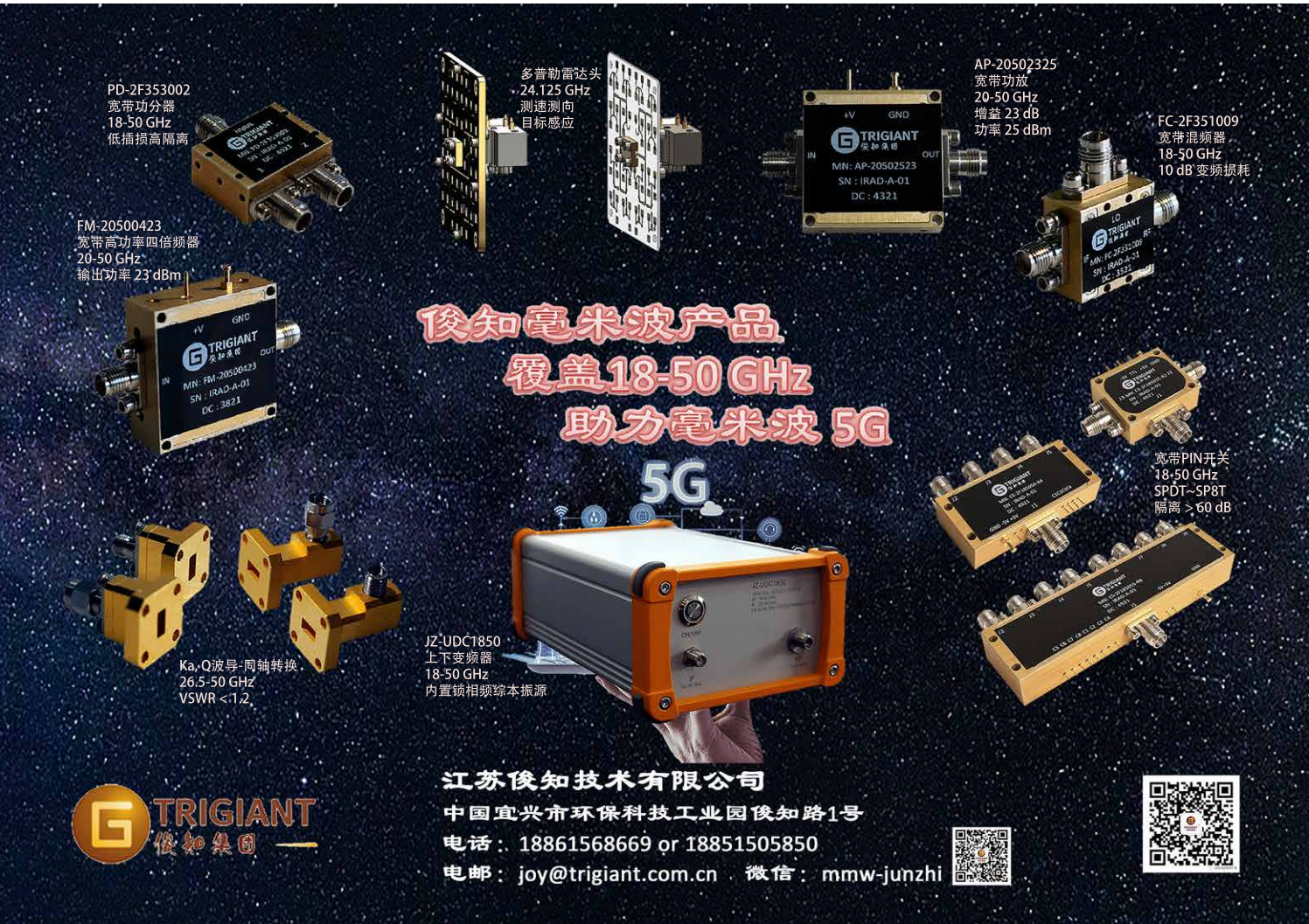
## 测试中使用SSB的同轴电缆

SSB的同轴电缆在佛罗里达大学的PSSL用于测试台，该测试台将根据NASA的合同评估LISA的电荷管理系统。据PSSL的技术总监之一Simon Barke说，LISA任务的成功取决于高频信号的相位稳定性，这些信号有助于跟踪测试块之间的距离变化。预计引力波对这个距离的影响只有几皮米。距离的变化将转化为极慢（mHz）的相位移动，在20MHz的电探测信号中，相位移动的数量为微弧度。20MHz信号的相位将在数小时内以亚皮秒的精度被追踪。

由测量链中的任何设备引起的假相位噪声都会破坏这些精细的测量。一个限制性的噪声源是电缆。温度波动会改变电缆的长度和电气特性，从而导致信号的相位变化。对于LISA项目，必须使用不会随温度变化而改变信号相位的电缆。

为了评估不同测试电缆的相位稳定性，要测量每米电缆的信号到达时间（Δt）随温度变化（ΔT）的变化。[8]一个2GHz的信号被分为两路并通过被测电缆和一个同样结构和长度的参考电缆。通过一个特殊的装置，被测电缆的28厘米部分在5℃至50℃的范围内被加热和冷却，这是LISA航天器内预期的温度范围。[8]在将两个信号混合到更方便的1.6GHz的频率后，测量它们的相位。测试使用了三种不同类型的五根候选电缆，以不同的介电层来区分：聚四氟乙烯（PTFE）、低密度聚乙烯（PE）或TF4™（TMS公司的专有氟碳介电材料）。

图3显示了被测电缆的相位稳定性的测量结果。每条轨迹的宽度反映了计算出的时序稳定系数的范围，这些系数在冷却



和加热期间是不同的。

结果表明，当材料在15℃-25℃的范围时，基于PTFE的电介质的电缆表现出固有的、非线性的相变。因此，这些电缆不适合LISA项目。

SSB使用PE介质的同轴电缆，特别是Aircell 5系列的电缆，具有平坦的最大温度系数。Δt/ΔT=1.4×10e-13，温度范围从5℃到50℃。这是行业中相位最稳定的电缆之一。被测电缆的规格，包括测得的每米最大时序稳定系数，总结在表1中。

根据测量结果，PSSL选择了Aircell 5电缆用于测试台，以评估NASA合同中的LISA电荷管理系统。Aircell 5电缆用于将电脉冲从频率基准和光电倍增管传送到Moku:Lab相位计。图4显示了佛罗里达大学PSSL的测试台。这些电缆可以确认电荷管理系统发出的和光电倍增管检测到的光脉冲符合LISA项目的严格时间要求。

图4：PSSL的测试台。资料来源：佛罗里达大学。

## 结论

SSB的同轴电缆被用于目前的基础研究项目，由于其相位稳定，也适用于空间应用。它们是TF4电缆的一个有吸引力的替代品，特别是用于地面支持设备和测试台。■

### 参考文献


1. Laser Interferometer Space Antenna, ESA, NASA, https://lisa.nasa.gov/.
2. LISA Consortium, Web: www.lisamission.org/.
3. "Almost 1.5 Million Euros in Funding for Participation in ESA Space Mission," Listen to the Universe, University Hamburg, Web: https://www.uni-hamburg. de/newsroom/presse/2020/pm47.html.
4. M. Gohlke, "A Highly Symmetrical Heterodyne Interferometer for Demonstrating an Optical Reading of the Inertial Sensors of the Space-based Gravitational wave Detector LISA," Humboldt-Universität zu Berlin, Web: www.physics. huberlin.de/en/qom/publications/pdfs/DA_Martin_Gohlke.pdf.
5. Max Planck Institute for Gravitational Physics, "LISA," Web: www.aei.mpg. de/40458/lisa.
6. D. Ivanov, "UF Awarded NASA Grant for Space Exploration Technology," The Gainesville Sun, January 2021, Web: www.gainesville.com/story/ news/2021/01/09/uf-given-nasa-contract-build-lisa-cms-space-exploration-technology/4125143001/.
7. K. Danzmann, "LISA Laser Interferometer Space Antenna, A Proposal in Response to the ESA Call for L3 Mission Concepts," Web: www.elisascience.org/files/publications/LISA_L3_20170120.pdf.
8. S. Barke, "Inter-Spacecraft Frequency Distribution for Future Gravitational Wave Observatories," Ph.D. Thesis, Max Planck Institute For Gravitational Physics (Albert Einstein Institute), 2015.