

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.02.06

欧洲空间原子钟组 ACES 与超高精度 时频传递技术新进展

杨文可¹, 孟文东², 韩文标², 谢勇辉², 任晓乾³, 胡小工^{2,4}, 董文丽^{2,4}

(1. 火箭军工程大学, 西安 710025; 2. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 3. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600; 4. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030)

摘要: 高精度时间频率的产生和超高精度时频信号的传递是现代物理学、天文学和计量科学的基础。空间原子钟组计划 (Atomic Clock Ensemble in Space, ACES) 是由欧洲空间局实施的基于国际空间站 (International Space Station, ISS) 微重力环境下的新型空间微波原子钟实验验证项目。概要介绍 ACES 项目基本情况, 重点介绍 ACES 项目的主要科学和技术目标, 围绕科学目标而形成的 ACES 组成结构, 并梳理涉及的关键技术, 特别介绍了 ACES 将应用的超高精度时频传递技术, 为我国自主研究并实现相关空间时间频率系统及其应用提供参考。最后简述了我国正在建设的空间站时频系统主要情况和实施计划。

关键词: 空间原子钟组; 超高精度时频传递; 广义相对论; 微波比对链路; 激光比对链路

中图分类号: TM935.1 **文献标识码:** A

1 引 言

高精度时频信号的产生和超高精度时频信号的传递, 对于现代物理学 (广义相对论验证)、天文学 (为深空探测所需无线电测距和干涉测量提供高精度时频信号源) 以及计量科学 (远距离高精度时间和频率比对) 具有非常重要的意义, 在卫星导航 (导航信号生成、星载自主时间保持和高精度授时服务)、地球物理 (地球重力势测绘、地球遥感) 等研究领域有重要应用。

原子钟是高精度时频信号的主要来源, 其物理基础是以微波或光信号激发原子产生能级跃迁, 该跃迁对应的共振谱线的宽度决定了原子钟输出信号的频率稳定度。谱线宽度越窄, 频率稳定度越好^[1]。根据量子力学测不准原理, 共振谱线宽度与原子和微波或光信号相

收稿日期: 2015-12-07; 修回日期: 2016-01-25

资助项目: 国家自然科学基金 (U1231107)

通讯作者: 杨文可, wenkeyang@foxmail.com

互作用的时间成反比,通过减慢原子的运动速度,即冷却原子的方法,可获得更长的相互作用时间,进而产生更窄的共振谱线宽度。同时,减慢原子的运动速度可减小原子钟频率的系统偏差^[2]。考虑到在微重力环境下原子更容易冷却,空间微重力环境为提高原子钟频率稳定度提供了有利条件。以微波铯原子钟为例,地面实验室环境下,铯原子冷却温度最好能做到 $2\ \mu\text{K}$ ^[3],其共振谱线宽度为 $1\ \text{Hz}$ 。由于地球引力场的影响,若要在地面实验室达到 $0.1\ \text{Hz}$ 的共振谱线,钟的尺寸,需要达到 $125\ \text{m}$! 考虑到磁场屏蔽和热稳定性,要做到这样的大小是不现实的^[4]。而在空间微重力环境中,由于地球重力与轨道运动的离心力相互抵消,更容易使原子冷却到极低的温度 ($1\ \mu\text{K}$)。以铯原子为例,在此温度下其运动速度将降低到 $7\ \text{mm/s}$ ^[5]。微重力环境下这些原子还可以保持极低的运动速度。理论分析表明,假设原子的运动速度为 $5\ \text{cm/s}$ 时,在其与微波信号相互作用区域长度不到 $1\ \text{m}$ 的情况下,就有望实现 $0.1\ \text{Hz}$ 的共振谱线宽度,即频率稳定度可达到 10^{-16} 量级。

另外,由地球板块漂移等引起高程 $1\ \text{cm}$ 的变化和 $1\ \text{cm/a}$ 的相对运动,引力红移和一阶多普勒频移作用将导致原子钟的频率稳定度受限,使其大于 1×10^{-18} ^[6]。特别是对于频率稳定度已达到 10^{-18} 量级的光钟^[7]而言,地面的运行环境将限制光钟的性能进一步提高。而在空间环境中,通过对轨道参数的持续测量,引力红移和一阶多普勒频移将被精确确定^[6]。因此,从这个方面考虑,空间环境也更利于高精度原子钟运行。

超高精度时频传递技术是实现高精度时频信号远距离传递与测量的基础。同时,超高精度时频传递技术有非常重要的应用。例如,等效原理作为爱因斯坦广义相对论的基本假设之一,预言了著名的引力红移效应。尽管已经获得很多的实验验证,通过实现高精度空间原子钟(频率准确度达 10^{-16} 量级)与地面钟(频率准确度达 10^{-16} 量级或者更好)之间的频率比对,引力红移的测量相对不确定度可小于 3×10^{-6} ^[5]。

利用空间环境实现高精度时间频率基准,并实现空间原子钟与地面原子钟之间的超高精度时频传递,并在此基础上开展基本物理实验和其他应用研究是国际上重要的研究课题。美国国家航空航天局(NASA)和欧洲空间局(European Space Agency, ESA)竞相开展空间原子钟计划,包括NASA的SUMO/PARCS(Superconducting Microwave Oscillator Experiment/Primary Atomic Reference Clock in Space)^[8]、RACE(Rubidium Atomic Clock Experiment)^[9]和深空光钟任务(Deep Space Optical Clock Mission)^[10]、ESA的ACES(Atomic Clock Ensemble in Space)^[11]和SOC(Space Optic Clocks)^[12,13]计划、美国-沙特-德国合作的mSTAR(mini Space Time Asymmetry Research)任务^[14]等。NASA的SUMO/PARCS和RACE项目被终止,而NASA的深空光钟任务计划在2016年将汞离子光钟(在稳定的实验室环境下,10 d内走时误差不超过 $1\ \text{ns}$,对应于频率稳定度约 $1.157 \times 10^{-15}/10\ \text{d}$)搭载在轨道测试平台卫星上发射,开始为期1 a的演示实验,该计划的具体报道较少。2005年提出的SOC是ACES的后续计划,预计于2020年左右实施,计划将光格晶钟(基于镱原子和铯原子,频率稳定度达 $1 \times 10^{-15}/\text{s}$,频率不确定度达 5×10^{-17})搭载在国际空间站(International Space Station, ISS)上。美国-沙特-德国合作的mSTAR任务计划将频率稳定度均达到或超过 10^{-15} 的碘光钟和光学腔频率源搭载在低轨卫星上,测量Kennedy-Thorndike系数以测试狭义相对论,然而,具体实施计划未见报道。同时,ESA组

织的 ACES 项目是国际上最早开展并即将发射升空的实验, 而且有较系统和全面的报道。我国的载人航天工程也计划在 2020 年前后开展基于空间站的空间原子钟组及高精度时频传递实验。对 ACES 项目情况、科学目标与应用、关键技术等进行概括和梳理可为我国自主开展相应空间计划提供有益参考。

2 ACES 项目概述

1997 年提出的 ACES 是欧空局实施的利用国际空间站 ISS 微重力环境的微波原子钟实验计划^[4], 预计于 2017 年上半年发射, 设计寿命为 3 年, 主要包括两个空间原子钟, 分布全球的地面高精度原子钟网络, 以及空间钟与地面钟之间建立的超高精度时间频率传递链路。以此为基础, ACES 计划实现一系列基础物理实验目标和应用研究, 包括爱因斯坦广义相对论验证、基础常数的时变特性测试和局部洛伦兹不变性 (Local Lorentz Invariance) 实验等基础物理实验和包括相对论重力测量、GNSS 无线电掩星和反射波测量与大气时延研究等地球物理应用研究项目^[15]。本文将在第 3 章具体介绍 ACES 项目的科学目标与应用研究内容。本章将从空间段和地面段两方面介绍 ACES 的系统组成和结构概况。

具体来说, ACES 的系统组成和结构是围绕实现高精度时间频率信号的产生和超高精度时频信号的传递这两个基本功能服务的。可以将 ACES 组成单元按照空间段、地面段, 以及服务于实现高精度时间频率信号的产生, 服务于实现超高精度时频信号的传递进行分类, 如表 1 所示。其中, ACES 地面段的国际空间站 ISS 控制中心 (NASA 控制中心和 Columbus 控制中心), 以及 ACES 的用户支持和运行中心 USOC 负责系统运行监控、数据处理与管理等, 同时服务于两个基本功能的实现。下面, 将在 2.1 节和 2.2 节介绍表 1 中列出的具体单元的一些基本情况和相互关系。

表 1 ACES 组成单元归类

	空间段	地面段
高精度时间频率信号的产生	激光冷原子铯钟 PHARAO	参与 ACES 项目的研究机构的地面原子钟
	空间主动型氢钟 SHM	国际空间站 NASA 控制中心
	频率比对和分发单元 FCDP	国际空间站 Columbus 控制中心 用户支持和运行中心 USOC
超高精度时频信号的传递	微波比对链路 MWL (飞行件)	微波比对链路 MWL (地面设备)
	激光比对链路 ELT (飞行件)	激光比对链路 ELT (地面设备)
	载荷设备与地面通信电脑 XPLC	国际空间站 NASA 控制中心
	GNSS 接收机	国际空间站 Columbus 控制中心 用户支持和运行中心 USOC

2.1 ACES 空间段

ACES 的空间段, 也就是空间载荷, 搭载在 ISS 的哥伦布 (Columbus) 实验舱外, 如图 1 所示。ISS 的轨道为倾角为 51.6° 的近圆轨道, 轨道平均高度为 400 km, 平均轨道周期为 $90 \text{ min}^{[15]}$ 。

ACES 载荷内部组成见图 2, 核心载荷是一台激光冷原子铯钟 (Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbit, PHARAO) 和一台空间主动型氢钟 (Space Hydrogen Maser, SHM)。ACES 空间时频信号将综合 SHM 的短期稳定性和 PHARAO 的长期稳定性与频率准确度特性。ACES 的空间段还包括用于 PHARAO 与 SHM 之间的频率比对及 ACES 载荷内部时钟信号分发的频率比对和分发单元 (Frequency Comparison and Distribution Package, FCDP), 和用于实现载荷设备与地面通信的电脑 (eXternal Payload Computer, XPLC)。如引言提到的, 激光冷原子铯钟 PHARAO^[16] 将受益于空间微重力环境, 实现频率准确度和长期频率稳定度达 10^{-16} 量级的时间频率信号, 由法国航空局 (Centre National d'Etudes Spatiales, CNES) 投资开发, 研制参与方有 SYRTE, LKB 和 CNES^[17]。SHM 具有优异的中期频率稳定度 ($3 \leq \tau \leq 3000 \text{ s}$)^[18], 由 SpectraTime 负责研发^[17,18]。

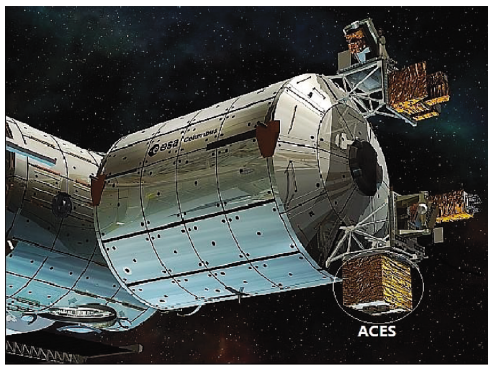


图 1 ACES 载荷位置^[19]

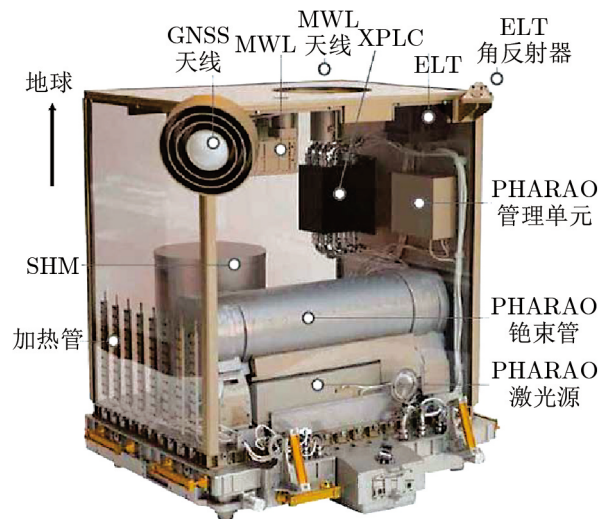


图 2 ACES 载荷内部组成^[4]

ACES 项目的另一个重要任务是实现空间高精度时间频率信号与地面之间的高精度时间频率传递。为进行相互验证, 采用两种时间频率传递方式: 微波双向时间频率传递和激光双向时间频率传递, 前者由微波比对链路 MWL (MicroWave Link) 实现, 后者由激光比对链路 ELT (European Laser Timing) 实现。MWL 和 ELT 都分为载荷飞行件 (属于 ACES 空间段) 和地面站设备 (属于 ACES 地面段, 具体在 2.2 节中介绍) 两部分, 且载荷飞行件与 ACES 空间时间频率信号相连, 地面站设备与参与比对的地面时间频率信号相连。MWL 由德国 TimeTech, EREMS, Steinbeiss TZR, MIRAD 负责研发^[17]。ELT 由捷克空间研究中心负责研发^[17]。

ACES 的基础物理实验等科学应用还要求获知 ACES 载荷的精确轨道信息。为此, ACES 载荷还包括一台 GNSS 接收机, 由法国 EREMS (Electronic Engineering and Manufacture Software development)、美国 JAVAD、德国 Geoforschungszentrum GFZ Potsdam 共同研发^[17]。

2.2 ACES 地面段

ACES 地面段负责对 ACES 系统运行监控和管理^[20], 分为以下四个部分^[20]。

(1) 国际空间站 ISS 的 NASA 控制中心和 Columbus 控制中心 (位于德国航空航天中心, DLR) 建立的地面与空间的通信链路, 完成对空间段的遥测遥控等在轨任务管理。

(2) 位于法国图卢兹的国家空间研究中心的 CADMOS 中心的用户支持和运行中心 (Users Support and Operations Center, USOC), 负责监控整个 ACES 系统和提供数据服务, 包括运行准备、空间段遥测和地面段测量数据管理、处理。

(3) 全球分布的微波链路地面终端 (MWL Ground Terminal) 网络, 至少由 7 个固定终端和 1 个移动终端组成, 具有同时容纳 35 个终端的能力。负责连接参与 ACES 项目的实验室的地面原子钟, 使其参与 ACES 的微波时间频率传递, 并通过互联网与 USOC 互联, 获得空间站轨道数据实现天线位置调整; 同时, 将测量数据和地面原子钟工作参数传给 USOC。

(4) 激光比对链路 ELT 的地面站网络, 与 MWL 地面终端网络类似, ELT 地面站网络也将测量数据等传给 USOC。

ACES 地面段组成, 以及地面段与空间段的联系如图 3 所示。

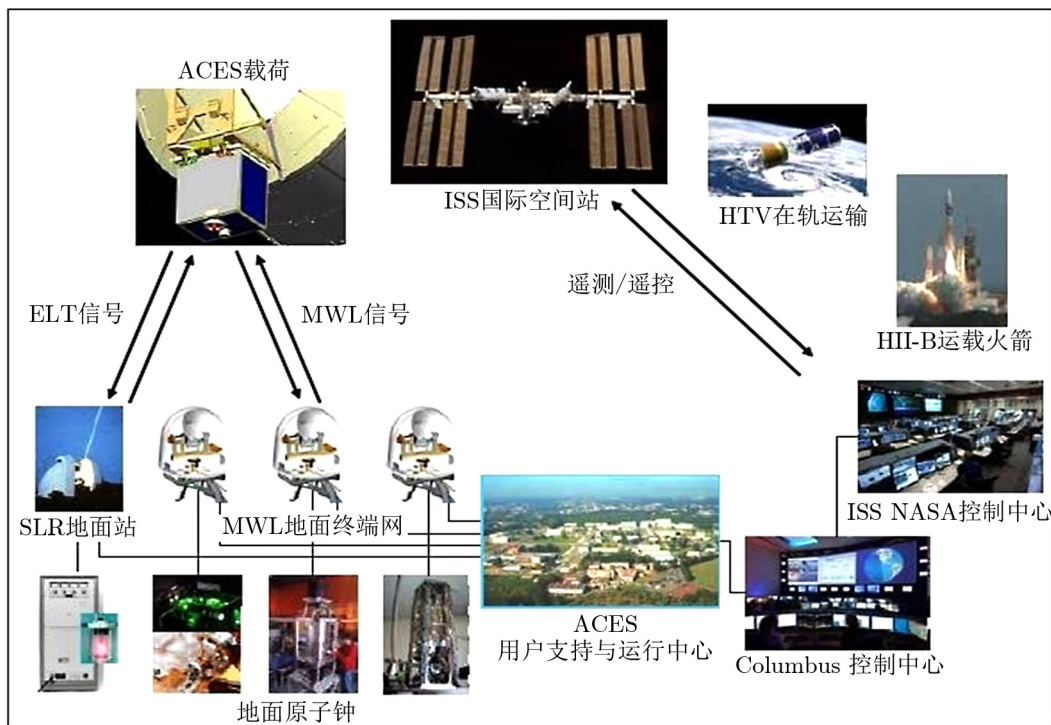


图 3 ACES 空间段与地面段^[19,21]

3 ACES 项目的科学实验及应用

利用 ACES 空间原子钟组高精度的时间频率信号, 及其与地面高精度原子钟之间建立的超高精度时间频率传递链路, 可开展包括引力红移的验证、基础常数的时变特性研究和局域不变原理验证在内的基础物理实验, 以及实现包括高精度远距离地面时钟比对、相对论重力测量、地球遥感、大气时延研究在内的科学应用。表 2 列出了各个基础物理实验及部分科学应用研究项目预期达到的关键指标。

表 2 ACES 项目的科学实验及应用

	项目	预期指标
基础物理实验	引力红移的验证	测量不确定度 2×10^{-6}
	基础常数的时变特性研究	测量不确定度: $1 \times 10^{-17}/\text{a}$ (1 a 以后); $3 \times 10^{-18}/\text{a}$ (3 a 以后)
	局域不变原理验证	测量不确定度 10^{-10}
科学应用	地面原子钟之间超高精度时间频率传递	时间传递不确定度: 100 ps (MWL); 50 ps (ELT)
	相对论重力测量	分辨率 10 cm (对应频率比对不确定度 10^{-17})
	地球遥感	
	大气时延研究	

3.1 基础物理实验

爱因斯坦广义相对论预言了引力红移现象, 即在具有重力势能 U_o 的观察者看来, 放置于具有重力势能 U_s 的原子钟较其标准频率具有一个偏差量 $\Delta f/f = -\Delta U/c^2$, 其中, $\Delta U = U_s - U_o$ ^[5]。目前最高的准确度, 是 1978 年由 Vessot 等人通过 GPA 实验实现的^[22]。ACES 将利用 PHARAO 的高准确度 (3×10^{-16}) 和地面原子钟的高准确度 (好于 10^{-16}), 对两者的频差进行准确测量来进行验证。当已知 ACES 载荷轨道数据 (位置和速度), 可计算 PHARAO 与地面钟的频差, 并与理论值进行对比。ACES 项目对引力红移的验证相对不确定度将达到 2×10^{-6} , 相对于 GPA 实验结果提升 70 倍^[23]。

ACES 通过测量基于不同跃迁 (或者说, 基于不同类原子) 的原子钟的频差, 可以研究基础常数的时变特性。事实上, 原子跃迁能量可由精细结构常数 α 和两个常数 m_q/Λ_{QCD} 和 m_e/Λ_{QCD} 表达, 其中, m_q 为夸克质量, m_e 为电子质量, Λ_{QCD} 为 QCD (量子色动力学) 质量尺度。ACES 通过实现频率分辨率达 10^{-17} 的地面原子钟之间相互比对, 可实现该 3 个基础常数时变特性测量不确定度达 $1 \times 10^{-17}/\text{a}$ (1 a 以后), $3 \times 10^{-18}/\text{a}$ (3 a 以后)^[23]。

相对论的基础之一是局域不变原理, Local Lorentz Invariance (LLI), 即任何局域物理实验结果都与自由下落装置的速度无关。1997 年, 进行了 GPS 星载钟和地面氢钟的比对,

对光来回的传播速度进行了测量, 基于此进行了 LLI 实验^[24]。若出现光速随方向和两钟之间的相对速度而改变的情况, 则说明 LLI 原理被打破。ACES 项目将进行类似的实验, 对光速变化的测量不确定度将达到 10^{-10} ^[23]。

3.2 科学应用

ACES 的科学应用主要有四个方面。

(1) 地面原子钟之间超高精度时间频率传递

由于 ACES 空间时频信号的高稳定性, 使得可以通过共视法 (如图 4 所示) 和非共视法 (如图 5 所示) 实现两个或多个地面站之间的时间频率传递。MWL 和 ELT 可实现的指标 (见表 3), 较目前广泛应用的基于卫星的时间频率传递方法 (如卫星双向时间频率传递 TWSTFT 和基于 GPS 的时间频率传递) 提高一到两个数量级^[15]。

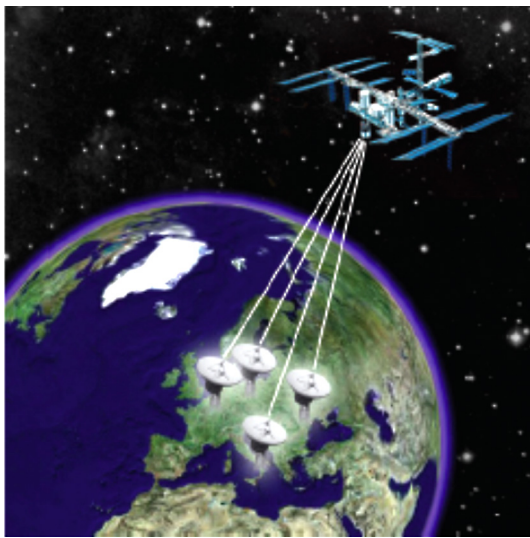


图 4 共视法时间频率传递^[25]

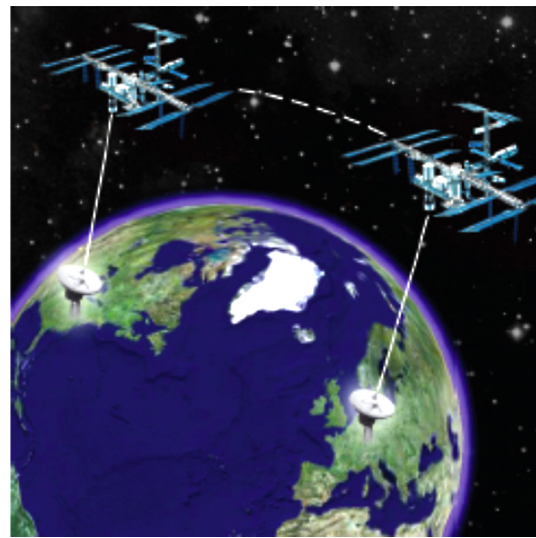


图 5 非共视法时间频率传递^[25]

表 3 共视法和非共视法时间频率传递预期目标

	MWL ^[25]	ELT ^[21,26]
频率分辨率	10^{-17} ^[17,23]	
共视法	$< 1 \text{ ps}/300 \text{ s}$	6 ps
非共视法	$< 2 \text{ ps}/10^3 \text{ s}$	$6 \text{ ps}/10^3 \text{ s}$
	$< 5 \text{ ps}/10^4 \text{ s}$	$7 \text{ ps}/10^4 \text{ s}$
	$< 20 \text{ ps}/10^5 \text{ s}$	
时间比对不确定度	100 ps	50 ps

(2) 相对论重力测量

相对论重力测量是对爱因斯坦广义相对论理论得出的引力红移现象的应用。在地球表面的引力场中, 高度上 10 cm 的改变量对应于 10^{-17} 频率偏移。当 ACES 实现该准确度量级的地面上两台原子钟的频率比对时, 就能够实现在地理高度上达到 10 cm 的分辨率^[15,23]。

(3) 地球遥感

基于 ACES 上搭载的 GNSS 接收机, 可实现如对来自海洋表面的 GNSS 反射波测量以进行海洋研究, 以及进行 GNSS 无线电掩星实验分析地球大气等地球遥感应用研究^[15]。

(4) 大气时延研究

ACES 的激光比对链路 ELT 和微波比对链路 MWL (具有两个下行频率) 为大气时延的研究提供了有用数据, 并且可采用 3 个频率的测量数据建立大气时延函数^[17,23]。

4 ACES 涉及的关键技术

空间高精度时间频率信号的产生, 以及空间钟与地面钟之间的超高精度时间频率传递是 ACES 项目实现必须解决的两个问题, 也是其关键技术。其中, 前者包括激光冷原子铯钟和空间主动型氢钟的设计与实现; 后者包括微波时间频率比对链路与激光时间频率比对链路的设计与实现, 以及两种比对链路测量数据处理中都需要应用的相对论框架下高精度时频传递数学模型。

4.1 空间高精度时频信号产生的关键技术

4.1.1 激光冷原子铯钟

如引言中提到的, 冷原子铯钟将受益于空间微重力环境。相比于地面附近的环境, 铯原子将更易冷却至极低的温度, 获得运动速度更低的铯原子, 从而减小原子钟频率的系统偏差。同时, 加上空间微重力环境减小了铯原子所受重力加速度的影响, 使得在不到 1 m 的与微波信号相互作用的距离内, 有望实现 0.1 Hz 的共振谱线宽度, 频率稳定度可达到 1×10^{-16} 量级。ACES 搭载的激光冷原子铯钟 PHARAO 正是为了验证空间微波原子钟的理论预言性能而研发的, 预期其频率稳定度达到 $1 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ (τ 为平滑时间), 频率准确度达到 3×10^{-16} ^[4,23], 是 ACES 载荷的核心部件。

4.1.2 空间主动型氢钟

空间主动型氢钟 SHM 为 ACES 载荷提供了可靠的具有优异中期频率稳定度的时频信号输出, 也为在轨验证 PHARAO 性能提供参考。为了满足航天应用的要求, 空间主动型氢钟在地面氢钟的基础上, 采用了金属微波腔、真空吸附泵和集成供氢等技术, 减轻整体重量至 50 kg 以下, 同时对各部件进行了结构加强以满足发射的抗振要求^[18]。而且, 空间在轨环境中面临 $\pm 40 \mu\text{T}$ 的地球磁场强度的变化问题, 同时还需满足体积和重量上的要求, 实现对电磁屏蔽的要求, 具有严峻挑战性^[4]。

表 4 SHM 频率稳定度指标

平滑时间/s	阿伦偏差/ 10^{-15}
1	<150
10	<21
100	<5.1
1000	<2.1
10000	<1.5

SHM 具体的频率稳定度指标^[18]见表 4。

预期 ACES 空间时频信号将兼具 PHARAO 的长期频率稳定度、频率准确度和 SHM 的中期频率稳定度。ACES 空间时频信号、PHARAO 和 SHM 三者的频率稳定度, 由阿伦偏差 (Allan Deviation) 表示, 曲线分别如图 6 中红线、绿线和蓝线所示。

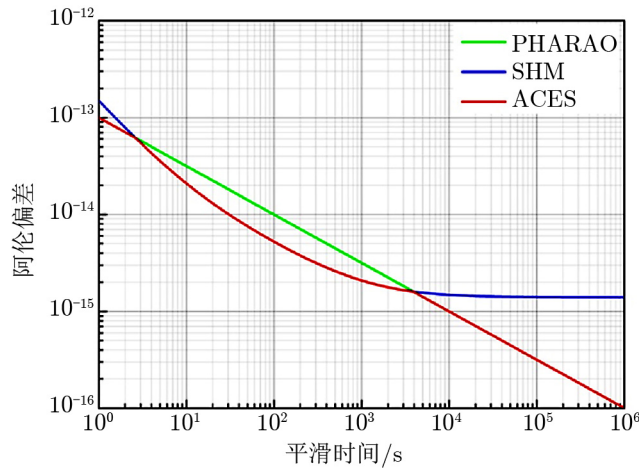


图 6 ACES 空间时频信号、PHARAO 和 SHM 的频率稳定度^[23]

4.2 超高精度时频信号传递的关键技术

为验证 ACES 空间时频信号 (特别是 PHARAO) 的频率稳定性和频率准确度, 并利用 ACES 空间时频信号实现地面时钟之间高精度时间频率传递、基础物理实验和其他科学应用, ACES 空间时频信号与地面时频信号之间采用微波时间频率比对和激光时间频率比对技术, 分别由微波比对链路 MWL 和激光比对链路 ELT 实现。

相对于地面站由于 ISS 具有较高的相对运动速度和加速度, MWL 和 ELT 实际上都采用了星地双向的 Λ 链路方式^[27] 进行测量, 以尽量减小 ISS 轨道误差、信号传播段误差以及地面原子钟位置误差等重要误差源引入的测量误差^[28]。星地双向 Λ 链路的特点是当 ACES 空间段接收到地面站发送的信号的同时, 向地面站发送信号。本小节主要描述 MWL 和 ELT 的设计思想和基本实现方式。

在频率准确度要求为 10^{-16} 水平下, 需要在地球引力场相对论框架下处理 MWL 和 ELT 的测量数据, 计算同一 GCRS (Geocentric Celestial Reference System) 坐标时下空间原子钟原时与地面原子钟原时之差。4.2.3 小节描述了相对论框架下高精度时频传递数学模型 (以 MWL 为例)。

4.2.1 微波时间频率比对技术

ACES 项目中采用微波比对链路 MWL 实现超高精度微波时间频率比对技术, 其设计概念是 1976 年 GP-A 实验中应用的 Vessot 双向技术^[22] 和 PRARE 设备^[29] 的升级版, 采用了更高的频段, 并实现载波相位和码相位的同时测量^[27]。

MWL 的 Λ 链路测量过程^[27] 如图 7 所示。MWL 地面站在坐标时 t_1 发射上行载波频率为 f_1 的信号, MWL 飞行件在坐标时 t_2 接收到该信号, 并分别在坐标时 t_3 和 t_5 发射下行载波频率为 f_2 和 f_3 的信号, 地面站分别在坐标时 t_4 和 t_6 接收到这两个下行信号。理想情况下, $t_2 = t_3 = t_5$ 。其中, 易实现 $t_3 = t_5$ 。而 t_2 与 t_3 之间存在时差 δT_{23} , ISS 定轨要求 $\delta T_{23} \leq 3 \mu\text{s}$ ^[30]; 另外, 当要求 MWL 实现空间与地面间时差测量误差小于等于 0.3 ps 时, 要求 $\delta T_{23} \leq 3 \text{ms}$ ^[28]。

MWL 具体链路信号设计^[27]如图 8 所示, 上行信号载波频率为 $f_1 = 13.475$ GHz (Ku 波段), 其上调制速率为 100 MChip/s 的伪随机噪声 (PN) 码和 1PPS 信号, 发射功率 2 W; 两个下行信号, 发射功率都为 0.5 W, 且都调制有 1PPS 信号和速率为 2.5 kBit/s 的 MWL-specific H/K 数据, 其中一个载波频率为 $f_2 = 14.70333$ GHz (Ku 波段), 其上也调制速率为 100 MChip/s 的 PN 码, 另一个载波频率为 $f_3 = 2.248$ GHz (S 波段), 调制 1 MChip/s 的 PN 码。S 波段的下行信号与 Ku 波段下行信号相结合, 可计算总电子数以修正电离层时延。MWL 的飞行件和地面站设备的 PN 码和载波分别与本地时钟同步, 都可实现 PN 码和载波相位测量, 码相位测量值可帮助解算载波整周模糊。1PPS 调制在 PN 码上, 用于标记时刻和消除 PN 码整周模糊。在每个观测弧段起始时, 下行信号上调制的 MWL-specific H/K 数据用于完成 MWL 空间飞行件与地面站之间时间同步。

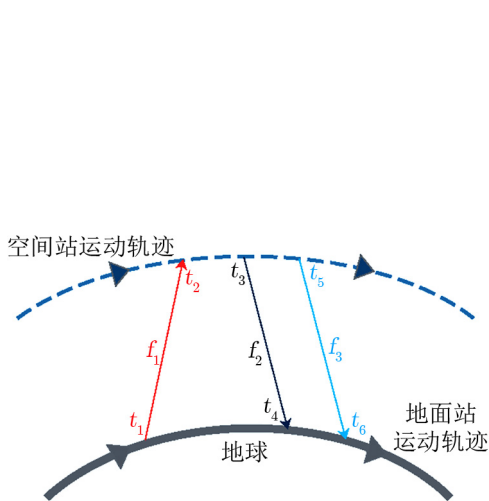


图 7 MWL 的 A 链路测量过程示意图^[31]

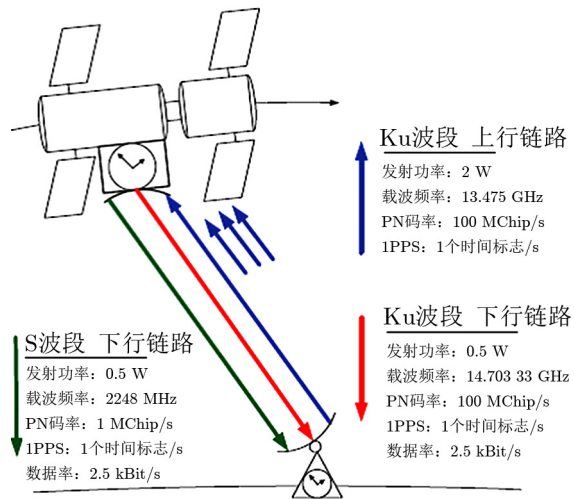


图 8 MWL 链路信号设计^[27]

为了降低设备时延对双向时差测量的影响, 理论上, 要求 MWL 的飞行件和地面站的硬件和软件设计完全一致^[27]。MWL 空间飞行件包括两个发射机 (分别工作在 Ku 波段和 S 波段) 和四个 Ku 波段的接收通道, 使得可以同时接收四个地面站信号。MWL 地面站有两个接收机 (分别工作在 Ku 波段和 S 波段) 和一个 Ku 波段的发射机。

MWL 空间飞行件和地面站内建有校准环路, 与测量链路同时工作, 监测设备时延^[27], 保证长期稳定度^[32]。MWL 地面站设备由天线罩平台和服务平台组成^[32]。其中, 天线罩平台由天线罩 (图 9), 以及天线罩内的直径 60 cm 的天线、电子设备单元和伺服单元构成 (图 10)。天线罩用于保护罩内设备, 并可帮助稳定罩内空气温度。服务平台包括控制计算机、天线调整控制器、电源和不间断电源 (UPS) 及冷水机。

在实现 ACES 空间时频信号与地面时频信号直接对比时, 微波链路 MWL 引入的相位噪声要求为: 对 ACES 时频信号的频率稳定度恶化程度小于原子钟频率稳定度的 20%^[33], 由时间偏差 TDEV 表示 (见表 5)。考虑到 ISS 对位于欧洲西部的地面站平均连续观测时间, 重点规定了平滑时间在 300 s 时 MWL 引入的时间偏差。同时, 时间传递不确定度小于 100 ps^[23]。

图 9 天线罩^[32]图 10 天线、电子设备单元和伺服单元^[32]表 5 MWL 链路时间偏差指标^[15,32]

平滑时间	时间偏差/ps
300 s	<0.3
1 d	<7
10 d	<23

4.2.2 激光时间频率比对技术

ACES 项目中采用欧洲激光时间传递 ELT^[34] 实现超高精度激光时间频率比对技术, ELT 是继欧洲的 T2L2^[35]、中国的 LTT (Laser Time Transfer)^[36] 和美国的 LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter)^[37] 项目后, 利用激光脉冲向太空传递或接收时间信号的技术方法。ELT 是 T2L2 的后续项目, 极大地改进了 T2L2 采用多光子测量模式而引入时延和测时误差的不足, 采用了与 LTT 相同的单光子测量模式^[4], 具有高准确度的内部时延校准, 解决了多光子测量引入时延和测时误差的问题。

ELT 中, 激光短脉冲由地面激光测距站发出, 并依据地面原子钟时间标记发射时刻 (t_{start})。空间站探测到单光子后, 依据空间原子钟时间标记接收时刻 (t_{stop1}), 同时位于 ACES 空间段的 ELT 反射器将激光脉冲返回地面站, 并依据地面原子钟标记接收时刻为 (t_{stop2})。对每一个脉冲, 空地钟差 τ_{offset} 可由式 (1) 计算得到。

$$\tau_{\text{offset}} = t_{\text{stop1}} - t_{\text{start}} - \tau, \quad (1)$$

其中, τ 为激光上行传播时延, 由 t_{stop2} 和 t_{start} 计算包含几何距离时延, 以及相对论效应、大气时延和地球自转效应的修正量。

ELT 链路的一项重要指标是时间比对的精确度达到 50 ps (最好 25 ps) 水平, 可用于校验 ACES 的微波时间比对链路, 并使空-地和地-地之间原子钟同步准确度达到 50 ps (最终目标 25 ps) 水平^[38]。另外, 具体 ELT 链路的设计指标用时间偏差表示, 如表 6 所示。

因此, 如何降低时差测量的不确定度和提高设备时延的

稳定度是需要重点关注的问题。为了达到高稳定的时间测量, ELT 采用单光子探测模式, 要求保证空间段和地面段的 ELT 探测器接收端光通量非常低, 以避免时差测量的不确定度受到光子个数变化造成时间游动的影响^[38]。具体实施过程中涉及星载设备的探测、地面设备激光发射控制、地面激光发射能量控制等方面。同时, 由于太空中辐射等造成的设备工作环境差异巨大, 星载设备时延校准非常重要; 相似的工作也必须在地面站开展, 但由于地面系统涉及的设备更多, 系统更加复杂和庞大, 如何提高地面站的时延稳定度也是其中需要重点关

表 6 ELT 链路时间偏差设计指标^[21,23]

平滑时间/s	时间偏差
10~300	$<6 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$
300~10 ⁴	<4 ps
10 ⁴ ~10 ⁶	<7 ps

注的问题之一。

4.2.3 相对论框架下高精度时频传递数学模型

时间比对过程中的信号传递过程是电磁波在两台参与比对的原子钟之间的传播。由于两台原子钟都处于地球的引力场中，要想实现超高精度的时间频率传递，必须以广义相对论的电磁波信号传递理论为基础，计算信号的传输时间。为此，首先需要定义时间比对实验中的观测量。观测量必须是一个标量，即坐标无关的量^[39]。具体到单向的时间比对中，如图 11，在恰当选择的坐标系中，假设地面钟 (g) 在坐标时 t_1 时刻且其原时为 τ_1 产生信号并在 t_2 时刻上传至 ACES 空间钟 (s)，空间钟接收到该信号时刻为 t_3 并在 t_4 完成解码。则观测量可以定义为空间钟在 τ_1 时刻 (对应坐标时为 t_5) 和完成解码时刻之间的原时间隔^[28]，即

$$\Delta\tau^s = \int_5^4 d\tau \quad (2)$$

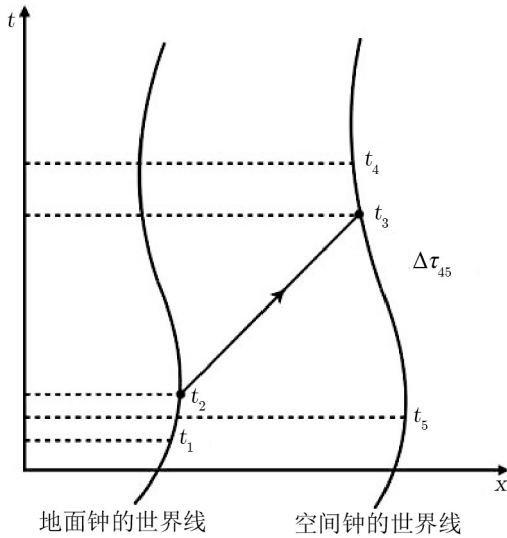


图 11 单向时间比对过程示意图^[28]

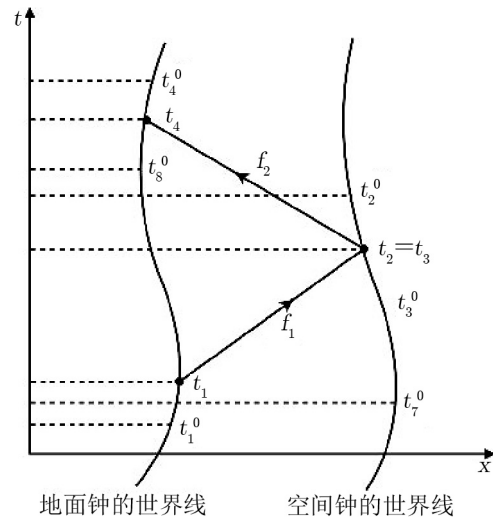


图 12 双向时间比对过程示意图 (Λ 链路)^[28]

根据文献 [28]，钟差可以由下式计算

$$\tau^s(t_4) - \tau^g(t_4) = \Delta\tau^s + [T_{23} + [\Delta^g + \Delta^s]^t]^g \quad (3)$$

其中， $\Delta\tau^s$ 为观测量，可由观测得到； Δ^g 为地面钟原时记录的编码时延； Δ^s 为空间钟原时记录的解码时延； $[\]^t$ 为将原时转换为坐标时的计算标记； $[\]^g$ 为将坐标时转换为地面钟原时的计算标记； T_{23} 为信号在地面钟和空间钟之间传播的坐标时间间隔，可以根据光在引力场和介质中的传播理论计算出来。

根据广义相对论，原时间隔可以通过下式和坐标时间间隔互相转换，

$$\Delta\tau \approx \left(1 + \frac{g_{0i} v^i}{g_{00} c} + \frac{1}{2} \frac{g_{ij} v^i v^j}{g_{00} c^2} \right) \sqrt{-g_{00}} \Delta t \quad (4)$$

其中, c 是真空中光速, $v^i = dx^i/dt$ 是某个钟对于选择的坐标系 (t, x^i) 的速度, $g_{\mu\nu}$ 为度规张量。上式中出现的指标, 希腊字母 μ, ν 等表示数字 0 到 3, 而拉丁字母 i, j 等表示数字 1 到 3。注意这里使用了爱因斯坦求和约定, 即重复出现的指标自动求和。

目前的时间频率比对实验都设定在近地空间, 因此地心天球参考系 GCRS 是用来计算信号传播时间 T_{23} 的最佳选择。先暂时忽略介质的影响, 考虑真空中的情况。根据国际天文联合会 (IAU) 2000 年形成的决议, GCRS 的地球引力场 1 阶后牛顿度规 (1PN)^[41,44] 为:

$$\begin{cases} G_{00} = -1 + \frac{2W}{c^2} \\ G_{0a} = -\frac{4}{c^2}W_a \\ G_{ab} = \delta_{ab} \left(1 + \frac{2W}{c^2} \right) \end{cases} . \quad (5)$$

上式中, W 为标量势, W_a 为矢量势; 当 $a = b$ 时, $\delta_{ab} = 1$, 当 $a \neq b$ 时, $\delta_{ab} = 0$ 。这样从时间传递函数 (TTF)^[45], 可以得到真空中位于坐标 (T_0, \mathbf{X}_0) 的时钟 g 发出的电磁信号传播到 \mathbf{X} 处的时钟 s 所需的坐标时间间隔^[46] 为:

$$\Delta T_v = \frac{\rho}{c} + \frac{2}{c^3} \int_{s_0}^{s'} \left(W - \frac{2}{c} \mathbf{W} \cdot \mathbf{n} \right) ds' , \quad (6)$$

其中, ρ 为两点间的欧氏距离, \mathbf{n} 为光线的单位矢量, s' 是沿光线的积分参数。

根据 Damour-Soffel-Xu 理论^[40-43], 在 GCRS 下, 势 W 和 \mathbf{W} 可以分解为地球自身产生的自势, 太阳、月球、各大行星产生的潮汐势, 以及惯性势等。正因为如此, 如果采用 GCRS 来计算传播时延, 太阳以及其他天体产生的引力效应只体现为潮汐势, 完全可以忽略^[47]。最新的计算表明, 甚至到飞秒精度 (10^{-15} s), 也无需考虑这些天体的影响 (对轨道高度为 400 km 的 ISS, 太阳最大只能产生 10^{-19} s 的时延)^[48]。而惯性势来自于 GCRS 相对于动力学非旋转参考系的转动产生的科里奥利力, 对时延的影响也仅在 5×10^{-19} s。自势中的矢量势部分来自于地球的自转, 产生的最大影响在 5×10^{-18} s。这些估计都是针对轨高 400 km 的卫星。这样, 只需考虑由地球的质量部分 (包括质量分布) 产生的时延, 即

$$\Delta T_v = \frac{\rho}{c} + \frac{2G}{c^3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{p=0}^l \frac{(-1)^l}{l!} \frac{l!}{p!(l-p)!} M_L n^p \partial_{L-P}^{\perp} \left[\partial_s^p \ln \frac{s+r}{s_0+r_0} - \left(\partial_s^p \ln \frac{s+r}{s_0+r_0} \right) \Big|_{s=s_0} \right], \quad (7)$$

式中, G 为牛顿引力常数, M_L 为地球的质量多极矩, $L = i_1 i_2 \cdots i_l$ 以及 $n^P = n^{i_1} n^{i_2} \cdots n^{i_p}$ 。根据文献 [48] 的计算, 对飞秒量级的时延精度, 上式只需保留到质量四极矩, 即 $l \leq 2$ 。这样, 上式可以写成更加方便的形式:

$$\Delta T_v = \frac{\rho}{c} + \frac{2GM_E}{c^3} \ln \frac{r+r_0+\rho}{r+r_0-\rho} + \frac{G}{3c^3} M_E J_2 a_e^2 (\delta_{ij} - 3\delta_{i3}\delta_{j3}) I_{ij} , \quad (8)$$

r_0 和 r 为地面钟和空间钟到 GCRS 坐标原点的欧氏距离, M_E 为地球质量, a_e 为赤道半径。上式等式右边第二项就是熟知的夏皮罗时延, 第三项就是由地球四极矩 J_2 产生的时延, 其中

$$I_{ij} = \frac{\rho^i \rho^j}{\rho^3} \left[\frac{\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{r}}{r} \left(\frac{1}{d^2} - \frac{1}{r^2} \right) - \frac{\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{r}_0}{r_0} \left(\frac{1}{d^2} - \frac{1}{r_0^2} \right) \right] - \frac{\rho^i d^j}{\rho} \left(\frac{1}{r^3} - \frac{1}{r_0^3} \right) + \frac{d^i d^j}{d^2} \left[\frac{\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{r}}{\rho r} \left(\frac{2}{d^2} + \frac{1}{r^2} \right) - \frac{\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{r}_0}{\rho r_0} \left(\frac{2}{d^2} + \frac{1}{r_0^2} \right) \right], \quad (9)$$

这里 $\mathbf{d} = \mathbf{r} - \frac{\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{r}}{\rho^2} \boldsymbol{\rho}$ 。若时间比对的精度能到 10^{-17} s, 则还需考虑地球自转产生的引力时延。

再考虑介质 (大气、电离层等) 的时延, 即可得到信号在两钟之间的传播时间 T_{23} 。 Λ 链路比对 (图 12) 中的单向传播时延可以类似得到。这样我们就能通过式 (3) 计算出钟差 $\tau^s(t_4) - \tau^g(t_4)$ 。

图 12 中描述的是 ACES 中采用的 Λ 链路, 这要求空间原子钟在收到地面链路信号的同时向地面钟发送信号。这样钟差的表达式为^[28]:

$$\tau^s(t_2) - \tau^g(t_2) = \frac{1}{2} \{ \Delta\tau_{\text{mo}}^g(t_4^0) - \Delta\tau_{\text{mo}}^s(t_2^0) + T_{34} - T_{12} \}^g. \quad (10)$$

其中, $\Delta\tau_{\text{mo}}^g$ 和 $\Delta\tau_{\text{mo}}^s$ 称为修正的观测量:

$$\Delta\tau_{\text{mo}}^g(t_4^0) = \Delta\tau^g(\tau^g(t_4^0)) + \Delta_2^g + \Delta_2^s, \quad (11)$$

$$\Delta\tau_{\text{mo}}^s(t_2^0) = \Delta\tau^s(\tau^s(t_2^0)) + \Delta_1^g + \Delta_1^s, \quad (12)$$

T_{12} 和 T_{34} 是链路从地面原子钟到空间钟之间的传递时间。因为钟差表达式中最后两项相减, 则大气时延、引力时延中的夏皮罗时延以及地球 J_2 项造成的时延往返正好抵消。而地球自转以及惯性势产生的引力时延因为和光的传播方向有关, 无法抵消, 是单程的两倍, 须把两者计入钟差的计算中。地球自转产生的时延由下式给出:

$$\Delta T_R = -\frac{2G}{c^4} \mathbf{n} \cdot (\mathbf{I} \times \mathbf{S}), \quad (13)$$

其中 \mathbf{S} 为地球的自转角动量, 而

$$\mathbf{I} = \frac{1}{r} \left(\mathbf{n} - \frac{d\mathbf{s}}{d^2} \right) - \frac{1}{r_0} \left(\mathbf{n} - \frac{ds_0}{d^2} \right), \quad (14)$$

这里的 s, s_0 为积分参数。惯性势产生的时延表达式为:

$$\Delta T_I = \frac{1}{c^2} (\mathbf{d} \times \mathbf{n}) \cdot \boldsymbol{\Omega}_{\text{iner}} (s - s_0), \quad (15)$$

$\boldsymbol{\Omega}_{\text{iner}}$ 为 GCRS 相对于动力学无旋转参考系的角速度, 约为每世纪 $2''$ 。

5 小 结

目前, ACES 项目的主要进展情况^[4]为: 2014 年夏天, ACES 核心部件激光冷原子铯钟 PHARAO 的地面模拟空间环境下的性能测试已经完成, 由于地面引力场的影响, 可实

现的铯原子与微波的相互作用时间为 90 ms, 谱线宽度为 5.6 Hz, 频率稳定度测试结果为 $3.15 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 与预期模型相符, 并预测在微重力环境下, 可实现谱线宽度为 0.12 Hz, 频率稳定度可顺利达到 $1.1 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ 。然而, 对空间主动型氢钟 SHM 的测试却发现其温度系数和磁感应系数未达设计指标。特别是磁感应系数, 为设计指标的 4 倍, 达到 $4 \times 10^{-14}/\text{Gauss}$, 将使得 SHM 在轨频率稳定度降至 $1 \times 10^{-14}/2700 \text{ s}$ (半个轨道周期)。下一步, ACES 将采用更厚的磁屏蔽层设计来解决这一问题。2014 年 5 月, 已成功完成对微波比对链路 MWL 工程模型性能的全部测试, 在 300 s 处相位分辨率达到亚皮秒, 长期稳定度 (时间偏差表示) 好于 5 ps; ELT 的地面测试也显示其时间偏差可达到几个皮秒/300 s, 长期稳定度 (时间偏差表示) 好于 7 ps, 达到设计指标要求。

根据我国载人空间站的实施计划, 我国将通过国际合作与交流, 充分借鉴和利用国内外最新理论和技术研究结果, 通过自身对新理论、新方法和新技术的研究和应用, 2021 年至 2022 年随舱发射 1 个包含主动氢原子钟、冷原子微波钟和光晶格锶光钟的高精度时频系统和相应的对地时频比对链路, 研制和建造我国自主的、国际先进的空间站高精度时间频率系统, 推动基础物理理论的实验研究和相关工程应用研究。

和 ACES 比较, 我国空间站时频系统的先进性主要表现在三个方面。一是原子钟组增加光钟 (日稳定度和不确定度有望达到 10^{-18} 量级), 时间频率信号的频率稳定度和准确度将提高 1 个量级以上。二是在时频比对传递链路方面建有激光和微波时间频率传递链路, 微波传递链路增加 Ka 波段载波, 并具有相互测评功能, 以提高时间频率传递比对精度。三是运行时间为 5 a 以上, 长时间运行将提高精密测量精度和增加工程技术应用时间, 可以大量利用更高精度的地面光钟, 以更高精度地检验基础物理理论和更高精度地提供应用服务。

参考文献:

- [1] 翟造成, 张为群, 蔡勇, 等. 原子钟基本原理与时频测量技术. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2009: 17
- [2] Lemonde P, Laurent P, Simon E, et al. IEEE Trans. Instrum. Meas. 1999, 48: 512
- [3] Wynands R, Weyers S. Metrologia. 2005, 42(3): 64
- [4] Philippe L, Massonnet D, Cacciapuoti L, et al. C. R. Phys. 2015, 16: 540
- [5] Salomon C, Dimarcq N, Abgrall M, et al. C. R. Phys. 2001, 2: 1313
- [6] Schiller S, Goerlitz A, Nevsky A, et al. Nucl. Phys. B Proc. Suppl. 2007, 166: 300
- [7] Ludlow A D, Ye J. C. R. Phys. 2015, 16: 499
- [8] Sullivan D B, Ashby N, Donley E A, et al. Adv. Space Res. 2005, 36: 107
- [9] Fertig C, Gibble K, Klipstein B, et al. Jt. Meet. Eur. Freq. Time Forum IEEE Int. Freq. Control Symp. Danvers: IEEE, 1999: 145
- [10] <http://www.nasa.gov/feature/the-deep-space-atomic-clock>, 2016
- [11] Feltham S, Gonzalez F, Puech P. Jt. Meet. Eur. Freq. Time Forum IEEE Int. Freq. Control Symp. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 1999: 148
- [12] Schiller S, Gorlitz A, Nevsky A, et al. Eur. Freq. Time Forum IEEE Int. Freq. Control Symp. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2012: 412
- [13] Bongs K, Singh Y, Smith L, et al. C. R. Phys. 2015, 27: 553

- [14] Schuldt T, Saraf S, Stochino A, et al. *Jt. Meet. Eur. Freq. Time Forum*. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2015: 47
- [15] Cacciapuoti L, Salomon C. *The European Physical Journal Special Topics*. 2009, 172: 57
- [16] Laurent P, Abgrall M, Jentsch C, et al. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* 2006, 84: 683
- [17] Hess MP, Stringhetti L, Hummelsberger B, et al. *Acta Astronaut.* 2011, 69: 929
- [18] Goujon D, Rochat P, Mosset P, et al. *Eur. Freq. Time Forum*. Noordwijk: ESA, 2010: 1
- [19] <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/iss-aces-pharao>, 2016
- [20] Daganzo E, Feltham S, Much R, et al. *Jt. Meet. Eur. Freq. Time Forum IEEE Int. Freq. Control Symp.* Stoughton: The Printing House, 2009: 1146
- [21] Schlicht A, Schreiber U, Prochazka I. <http://cdsis.gsfc.nasa.gov/lw17/docs/presentations/session13/05-TheEuropeanLaserTimingExperimentandDataCenter.pdf>, 2011
- [22] Vessot RFC, Levine MW, Mattison EM, et al. *Phys. Rev. Lett.* 1981, 45: 2081
- [23] Luigi C, Christophe S. *J. Phys.* 2011, 327: 1
- [24] Wolf P, Petit G. *Phys. Rev. A.* 1997, 56: 4405
- [25] [wsn.spaceflight.esa.int/docs/Factsheets/20 ACES LR.pdf](http://wsn.spaceflight.esa.int/docs/Factsheets/20%20ACES%20LR.pdf), 2016
- [26] Brandl N, Dassing R, Eckl J, et al. <http://cdsis.gsfc.nasa.gov/lw17/docs/presentations/wg/ELT.pdf>, 2011
- [27] Seidel A, Hess MP, Kehrer J, et al. *Jt. Meet. Eur. Freq. Time Forum IEEE Int. Freq. Control Symp.* Stoughton: The Printing House, 2007: 1295
- [28] Delva P, Meynadier F, Pocin-Lafitte C Le, et al. *Eur. Freq. Time Forum*. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2012: 28
- [29] Bedrich S, Flechtner F, Foerste Ch, et al. <http://earth.esa.int/workshops/ers97/papers/bedrich/index.html>, 1997
- [30] Duchayne L, Mercier F, Wolf P. *Astron. Astrophys.* 2009, 504: 653
- [31] Duchayne L, Wolf P, Cacciapuoti L, et al. *IEEE Int. Freq. Control Symp.* Stoughton: The Printing House, 2008: 515
- [32] Hess MP, Kehrer J, Kufner M, et al. *Jt. Meet. Eur. Freq. Time Forum IEEE Int. Freq. Control Symp.* Danvers: IEEE, 2011: 1
- [33] Uhrich P M, Guillernot P, Aubry P, et al. *IEEE Trans.* 2000, 47: 1134
- [34] Schreiber K U, Prochazka I, Lauber P, et al. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2010, 57: 728
- [35] Samain E, Vrancken P, Guillemot P, et al. *Metrologia.* 2014, 51: 503
- [36] Wendong M. *Adv. Space Res.* 2013, 51: 951
- [37] Vondrak R, Keller J, Chin G, et al. *Space Sci. Rev.* 2010, 150: 7
- [38] Schlicht A, Schreiber U, Prochazka I, et al. http://www.lnf.infn.it/conference/laser2012/5friday/9.2schreiber/schreiber_p.pdf, 2012
- [39] 迈克尔·索菲, 韩文标. *相对论天体力学和天体测量学*. 北京: 科学出版社, 2015: 52
- [40] Damour T, Soffel M, Xu C. *Phys. Rev. D: Part., Fields, Gravitation, Cosmol.* 1991, 43: 3273
- [41] Damour T, Soffel M, Xu C. *Phys. Rev. D: Part., Fields, Gravitation, Cosmol.* 1992, 45: 1017
- [42] Damour T, Soffel M, Xu C. *Phys. Rev. D: Part., Fields, Gravitation, Cosmol.* 1993, 47: 3124
- [43] Damour T, Soffel M, Xu C. *Phys. Rev. D: Part., Fields, Gravitation, Cosmol.* 1994, 49: 618
- [44] Soffel M. *Astron. J.* 2003, 126: 2687
- [45] Stefano B, Olivier M, Mariateresa C, et al. *Classical Quantum Gravity.* 2014, 31: 15021
- [46] Soffel M, Han W B. *Phys. Lett. A.* 2015, 379: 233
- [47] Reis J C, Huang C, Watkins M M. *Phys. Rev. Lett.* 1988, 61: 903
- [48] Han W B, Cheng R, Tao J, et al. *Astrophys. Space Sci.* 2015, 359: 1

Advances in Atomic Clock Ensemble in Space of Europe and Ultraprecise Time and Frequency Transfer

YANG Wen-ke¹, MENG Wen-dong², HAN Wen-biao², XIE Yong-hui²,
REN Xiao-qian³, HU Xiao-gong^{2,4}, DONG Wen-li^{2,4}

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 4. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China)

Abstract: One of the foundations for the development of modern physics, astronomy and metrology is the generation, transfer and measurement of high precision time frequency signals. As a space mission for the study of high precision time frequency signals, Atomic Clock Ensemble in Space, or ACES, sponsored by European Space Agency to launch in 2017 or later, will take advantage of the excellent stability performance of microwave atomic clocks in a microgravity environment. One clock using laser-cooled Cs atoms working together with one hydrogen maser clock are planned to be placed onboard the International Space Station in hope to produce a frequency standard with both accuracy and stability reaching the level of 10^{-16} . A microwave link along with a laser link will be set up between ACES and ground atomic clocks distributed around the world for high precision comparison and transfer. Various basic researches will benefit from a high precision space atomic clock such as the verification of Einstein's general relativity, detection of possible time variability of certain fundamental constants in physics, as well as brand new applications such as relativistic gravity and GNSS remote sensing. This paper reviews and summarizes the principle and architecture of this promising space mission. And more importantly some major challenges that ACES faces and tackles are discussed. China is developing its own space clock program, we hope this paper will encourage more science and technological efforts in related research areas.

Key words: atomic clock ensemble in space; ultraprecise time and frequency transfer; general relativity; microwave link; laser timing