

# 量子定位导航技术研究与发展现状

宋培帅<sup>1\*\*</sup>, 马静<sup>1</sup>, 马哲<sup>1</sup>, 张淑媛<sup>1</sup>, 司朝伟<sup>1</sup>, 韩国威<sup>1</sup>, 宁瑾<sup>1,3</sup>, 杨富华<sup>1</sup>, 王晓东<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院半导体研究所半导体集成技术工程研究中心, 北京 100083;

<sup>2</sup>中国科学院大学微电子学院, 北京 101408;

<sup>3</sup>中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 101408

**摘要** 最近二十年,作为一种新型导航技术,量子定位系统(QPS)因其特有的信息传输优势得到了飞速发展。简要介绍了卫星导航与惯性导航系统的原理及各自面临的问题,阐述了量子定位导航系统的概念与基本原理、量子导航的优势、量子导航的分类及国内外发展状况,并就目前量子导航所面临的问题及其发展前景提出了相应的观点。

**关键词** 量子光学; 量子定位系统; 卫星导航; 量子通信; 量子信息和处理

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.090003

## Research and Development Status of Quantum Navigation Technology

Song Peishuai<sup>1\*\*</sup>, Ma Jing<sup>1</sup>, Ma Zhe<sup>1</sup>, Zhang Shuyuan<sup>1</sup>, Si Chaowei<sup>1</sup>,  
Han Guowei<sup>1</sup>, Ning Jin<sup>1,3</sup>, Yang Fuhua<sup>1</sup>, Wang Xiaodong<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Engineering Research Center for Semiconductor Integrated Technology, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup>School of Microelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

<sup>3</sup>School of Electronics, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 101408, China

**Abstract** In recent twenty years, the quantum positioning system has developed rapidly as a new type of navigation technology because of its unique advantages in information transmission. After the introduction of the satellite navigation and inertial navigation systems and their respective problems, we mainly elaborate the proposition, fundamental principles, advantages and classification of quantum navigation. The research status of quantum navigation is also summarized. Finally, we put forward our views on current problems and prospects of the quantum navigation system.

**Key words** quantum optics; quantum positioning system; satellite navigation; quantum communications; quantum information and processing

**OCIS codes** 270.5565; 040.5570; 270.5585

## 1 引言

导航的概念自古有之,石器时代的天文导航、航海时代的地磁导航为古人的出行指明了方向。随着空间技术、电子信息技术、计算机科学、光学通信等科学技术的发展,这些古老的导航方法在最近几十年逐渐演变为以无线电导航、惯性导航为代表的各

种导航系统,导航、定位、授时(PNT)功能更加完善、成熟,人们几乎可以随时随地知道自己想要的位置、时间等信息。但对于要求更高的导航系统,传统定位技术的安全性、脆弱性及最终能达到的精度等方面的问题越来越需要苛刻对待。

量子定位系统(QPS)是在量子力学理论和量子信息论的基础上近些年发展起来的新一代导航定位

收稿日期: 2018-02-17; 修回日期: 2018-03-28; 录用日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(61474115, 61504130, 61704165, 51720105004)

\* E-mail: xdwang@semi.ac.cn; \*\* E-mail: pssong@semi.ac.cn

技术。该系统中信息的产生、测量与传输均有量子的参与,因其具有量子纠缠<sup>[1-2]</sup>、量子压缩<sup>[3-5]</sup>等现象,在信息传输的保密性、安全性和测量精度等方面有着独特的优势,能够在很大程度上解决传统导航系统中存在的问题。量子导航自提出之后得到了欧美各国的重视,根据定位方式的不同,在卫星有源导航系统与惯性无源导航系统的基础上分别发展了量子有源与无源定位系统,目前研究人员在两个方向均取得了一定的研究成果。随着量子理论与技术的进一步成熟,量子导航将在光量子通信与定位授时领域发挥越来越重要的作用。

虽然此前国内对量子导航定位系统的基本原理和结构均有介绍<sup>[6-9]</sup>,但是对量子有源与无源系统的发展状况报道较少。本文对两种系统的国内外研究状况分别进行了详细介绍,并通过对比传统导航定位系统面临的问题,分析了量子导航的优点,指出了量子导航目前面临的挑战,并展望了我国量子导航技术的发展前景。

## 2 卫星导航及惯性导航

### 2.1 卫星导航定位原理

以全球定位系统(GPS)为代表的卫星导航系统主要由在轨导航卫星、地面监控系统和用户接收机设备三部分组成;用户通过接收卫星信号,可以实现全天候、高精度、小误差的授时与定位,该类系统在通信、交通、航海、航天、制导、救援等方面得到了广泛应用。发展本国的导航系统对国家而言具有重要的战略价值,目前,国际上有美国的GPS导航系统、俄罗斯的GLONASS导航系统、欧盟的GALILEO民用全球卫星导航定位系统,以及逐渐趋于成熟的中国北斗导航系统等全球性导航系统,此外印度和日本等国也在开发建立区域性卫星定位系统<sup>[10]</sup>。

卫星导航系统之所以能够准确定位,源于三球定位原理。

地面控制段通过跟踪站对卫星进行监测,控制并注入导航电文,使卫星在相对稳定的轨道上绕地运行的同时不停地对外播报更新后的轨道参数信息,因此,卫星在各个时刻的空间位置都是确定的;通过测量从卫星发射的无线信号传播到用户接收机的时间,与无线电传播速度(光速)相乘,获得卫星与用户之间的距离;由于卫星与接收机之间存在时钟差,所以观测值不是真实距离,而是伪距。

已知一颗卫星的位置及该卫星到用户的距离,则用户将位于以卫星为球心、以距离为半径的球面

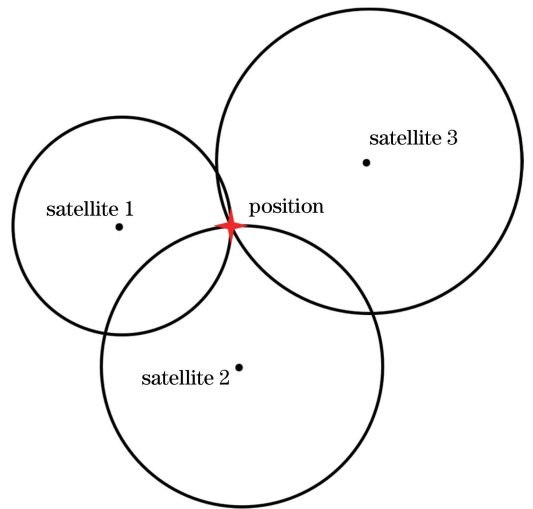


图1 三球定位原理

Fig. 1 Positioning principle of three balls

上的某个地方;如果已知两颗卫星位置及其到同一个用户的距离,则该用户将同时在两个球面上,即在两个球面相交的圆周上或在两个球面相切的切点上;进一步,如果已知第三颗卫星的位置及其与同一用户的距离,则第三个球面将与上述圆周相交于两个点<sup>[11]</sup>,再由对称性知这两个点分别位于南北半球,从而用户可以确定自身位置。

### 2.2 卫星导航系统面临的问题

如上文所述,在测量值与真实值之间存在时钟误差,这是由卫星钟差与接收机钟差导致的。此外卫星导航定位中依然存在很多其他误差,以GPS为例,按照误差性质可以分为系统误差和偶然误差。系统误差包括星历数据误差、卫星钟差、大气电离层和对流层对电磁波信号造成的折射误差等,其中星历数据误差作为起算误差是重要的误差来源,主要指卫星空间的位置计算与实际分布的差值,决定于轨道模型、观测方式等条件,目前GPS卫星轨道误差的等效误差为5~40 m。卫星钟差是指GPS卫星时钟与GPS标准时间的差异,尽管GPS上均有高精度原子钟,二者之间仍然存在0.1~1 ms的偏差与漂移,该值的表达式为

$$\Delta t = a_0 + a_1 \Delta t + a_2 \Delta t^2 + \int_{t_0}^{t_s} f(t) dt, \quad (1)$$

式中: $\Delta t = t_s - t_0$ 为 $t_s$ 时刻的卫星钟差; $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 分别为 $t_0$ 时刻的卫星钟差、钟速和卫星钟漂移率<sup>[12]</sup>; $\int_{t_0}^{t_s} f(t) dt$ 为随机误差,实际模型中不予考虑。用二阶多项式钟差预报模型可以使偏差与漂移缩小到20 ns左右,由此引起的定位等效误差大约为6 m。

偶然误差包括接收机地面环境引起的多路径效应误差等,多路径效应误差是指接收机除接收目标信号之外,还会接收天线周围经过一次或多次反射的信号,使测量值偏离真值,误差大小与接收机具体环境有关,从几厘米到十几厘米不等。上述这些偏差导致卫星导航系统在定位精度方面存在固有的弊端。

此外,电磁波在传播过程中不仅受到地形环境限制,且易受到宽频谱电子干扰和 GPS 欺骗干扰,使其在可用性和安全性上同样存在漏洞。导航卫星距地面  $2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$  km,这使得导航信号功率过低,甚至比普通的噪声还低 20 dB,且信号在传播过程中受到大气电离层、对流层、多径效应和民用射频等无意干扰,甚至可能会受到大功率压制和欺骗干扰等恶意干扰,这些干扰不断减弱传播信号,使其变得脆弱且易受攻击。2011 年及 2012 年美军的 RQ-170 哨兵无人侦察机和“扫描鹰”无人机分别被伊朗军方利用通信链路的破坏与坐标欺骗等电磁干扰技术捕获,让各国再次认识到 GPS 信号的脆弱性。虽然此后美方不断提高接收机抗干扰能力,但是卫星信号太弱的问题并没有得到根本解决,而在

深水、地下、地形复杂的密林山区和密集建筑区等环境中<sup>[6]</sup>,信号更易受到大幅削弱,更加难以实现精确导航。

### 2.3 惯性导航原理

惯性导航系统是指利用惯性传感器、基准方向及最初的位置信息来确定运载体的方位、位置和速度的自主式航位推算导航系统<sup>[13]</sup>。由于其不依靠接收卫星信号,属于无源定位系统,具有不向外辐射能量、隐蔽性好、不易受干扰、安全性高等优点<sup>[14-15]</sup>,尤其是在军事领域得到广泛应用。

惯性传感器主要是指角速度传感器和加速度传感器,即陀螺仪和加速度计。陀螺仪是感测物体姿态的一种装置,种类繁多,除了机械陀螺之外,还有压电陀螺、激光陀螺、光纤陀螺等,以微机电系统(MEMS)惯性导航系统中的 MEMS 陀螺仪为例,其基本原理是基于科氏(Coriolis)定理检测科氏加速度,并根据科氏加速度与旋转速率的关系实现角速度的测量<sup>[16]</sup>,如图 2 所示。系统以陀螺稳定平台模拟当地水平面,建立一个分别指向东、北及天顶方向的空间直角坐标系,用于测量载体相对于惯性空间的角位移或角速率。

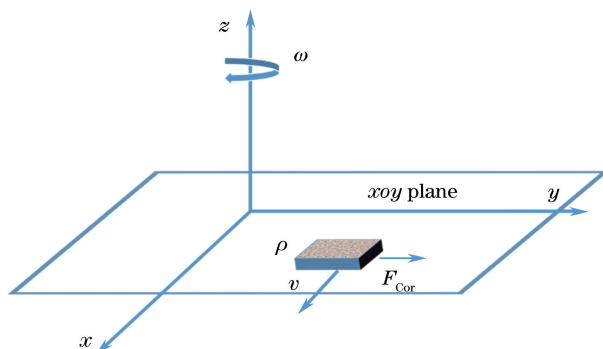


图 2 MEMS 陀螺仪工作原理

Fig. 2 Working principle of gyroscope

加速度计置于各个矢量轴上,用于测定载体相对于惯性空间的运动加速度。加速度计可简化为由质量块  $m$ 、弹簧  $k$  和阻尼  $c$  组成的二阶惯性系统。其工作原理如图 3 所示。由于惯性作用,质量块与基座发生相对位移,其值与加速度成比例,可通过该位移或惯性力来测量加速度。

惯导系统主要分为平台式惯导系统和捷联式惯导系统两大类。以捷联式惯性导航系统为例,其最大特点是没有机械式陀螺仪稳定平台,而直接将三组陀螺仪与加速度计固定在载体上,各组件敏感轴相互垂直放置,组成三维坐标系,系统的工作原理如图 4 所示。

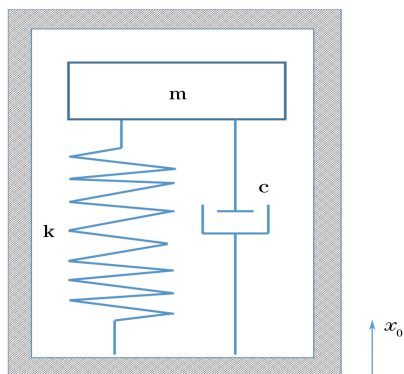


图 3 加速度计工作原理

Fig. 3 Working principle of accelerometer

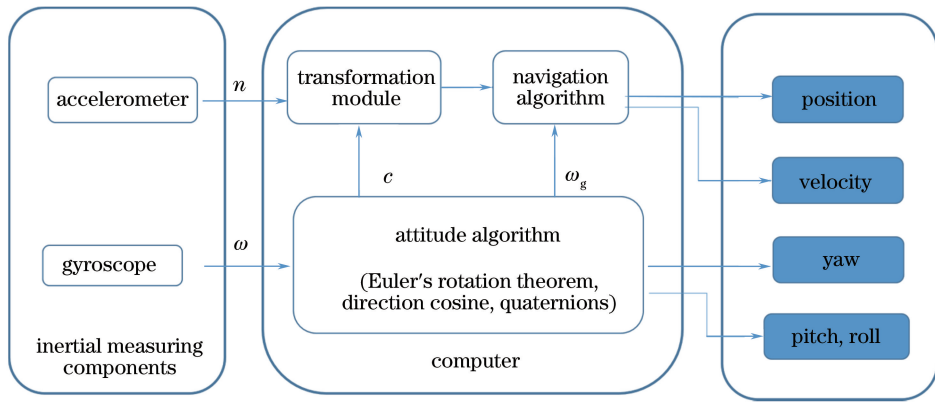


图4 惯性导航原理

Fig. 4 Principle of inertial navigation

在给定的初始运动状态下,依据经典物理学运动定律,通过一次积分可得到当前载体速度的方向和大小,再次积分可得载体的位置或距离。结合陀螺仪测量的载体角运动,经转换处理,进而得到载体姿态和航向。

## 2.4 惯性导航面临的问题

作为惯性系统中最重要元件,陀螺仪的漂移误差是导航系统中的主要误差来源。误差的起因一方面是陀螺仪本身结构、工艺不尽完善以及载体的线运动和角运动造成了系统中存在各种干扰力矩<sup>[17]</sup>;另一方面,陀螺仪时刻存在随机不定性漂移。除陀螺仪漂移误差外,系统中还存在平台初始误差、元件安装误差、冲击和振动引起的运动误差等,这些误差使得对载体的姿态和航向的测量精度存在瑕疵。

另外,传统的惯性导航系统因惯性平台的存在大都体积庞大,应用范围受限;基于MEMS陀螺仪与加速度计组成的惯性导航系统称为MEMS惯导系统,是众多陀螺仪系统中的一种,其余陀螺仪系统工作原理与陀螺仪种类有关,如光纤陀螺是基于光相干原理,通过光程差及与之对应的相位差信息,即可得到旋转角速度。MEMS惯导系统具有体积小、重量轻、耗能低等优势,不过MEMS陀螺仪在工作中存在角速率随机游走、角度随机游走、指数相关噪声、偏置不稳定性等随机误差,其中角速率游走误差、指数相关噪声均与指数相关时间函数有关<sup>[18]</sup>,因此该系统存在不可避免的对时间积分的运算误差,且该值随时间进行累积<sup>[19]</sup>,需要建立模型以校正误差,运用Allan方差法<sup>[20-22]</sup>可以得到整个积分时间上完整的标准差曲线,由曲线上各段斜率的变化便可分离出各项误差系数。该方法利用方差与功

率谱密度之间存在的定量关系,在时域上直接从MEMS陀螺仪的输出数据得到MEMS陀螺仪中各误差源的类型和幅度<sup>[23]</sup>。不过误差分析模型均较为复杂,限制了MEMS惯性导航系统作为独立导航系统的发展。

## 3 量子导航

### 3.1 量子导航的概念

量子定位系统的概念最早是于2001年由美国麻省理工学院(MIT)电子学研究实验室从事博士后研究的Vittorio Giovannetti博士、Lorenzo Maccone博士与从事量子计算和量子通信研究的机械工程教授Seth Lloyd在他们发表的一篇名为“Quantum-enhanced positioning and clock synchronization”的文章中提出的<sup>[24]</sup>。

在第2节对传统定位系统的定位原理和存在问题的分析中已经指出,卫星导航通过向在轨卫星发射电磁波脉冲并检测信号到达接收机的时间延迟来实现定位的方式导致了伪距误差。与卫星导航采用的电磁波信号不同,QPS的测距信号是具有量子特性的脉冲信号,这种信号由没有电荷和质量的光子组成。通过量子理论与量子力学可知光量子具有奇特的量子纠缠和量子压缩特性。

量子纠缠最初于1935年提出<sup>[25]</sup>,是指粒子在由两个或两个以上粒子组成的系统中相互影响的现象,虽然粒子在空间上可能分开,但搅动其中任意一个粒子,另一个粒子不可避免地发生性质改变,这种关联现象称为量子纠缠。

如图5所示,激光照射偏硼酸钡(BBO)晶体,制备出相互纠缠的光子对,沿着特定方向测量某一粒子,若所得结果为自旋向上,则原本处于叠加态的另

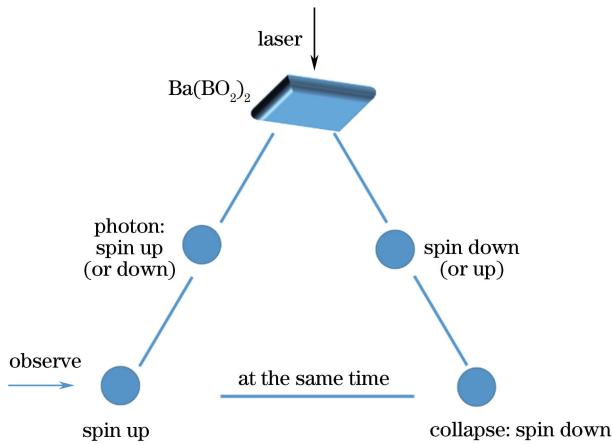


图5 量子纠缠的概念

Fig. 5 Concept of quantum entanglement

一粒子瞬间坍塌为自旋向下。在离子阱<sup>[26]</sup>、原子—光腔<sup>[27]</sup>、自发参量下转换<sup>[28]</sup>等多种体系中都已经 在实验中实现了纠缠态的制备,其中又以在自发参量下转换体系中产生光子纠缠态的方案较为简单易行<sup>[29]</sup>,常用的两光子量子纠缠态又称纠缠光子对或纠缠对<sup>[30]</sup>。量子纠缠概念提出后,纠缠光子的制备一直备受关注。1997年,奥地利 Zelinger 课题组潘建伟等<sup>[31]</sup>在参量下转换产生的纠缠光子对中实现了量子纠缠交换,之后中国科学技术大学潘建伟教授团队分别于2004年、2007年、2012年在国际上首次实现对五光子<sup>[32]</sup>、六光子<sup>[33]</sup>、八光子<sup>[34]</sup>纠缠的操纵,并且该团队在2016年制备了综合性能最优的纠缠光子源,首次成功实现十光子纠缠<sup>[35]</sup>,其多粒子纠缠操纵能力在世界上处于顶尖地位。

在脉冲信号中,光量子可以被压缩,且这些处于纠缠态的大量光子的频率二阶关联<sup>[36]</sup>,赋予了信号超乎想象的强相关性和高密度程度,使得脉冲能以一定的速率并且成束地到达检测点,这为信号的测距和测时提供了新的方法,并且对于测量精度的提高具有重要意义。

此外,不同于 MIT 提出的基于量子纠缠和压缩特性的量子定位系统,据英国“新科学家”网站2014年5月报道,英国国防科学与技术实验室(DSTL)正在研究一种以超冷原子为基础的加速度计,以此作为惯性传感器件,从而建立新一代惯性导航系统——量子导航定位系统<sup>[37]</sup>。与传统惯性加速度计不同,这种加速度计工作在超低温下,原子会变成叠加量子态,极易受到外力影响而被破坏,因此对加速度及地心引力十分敏感,可用来测量载体姿态的细微变化;同样,基于原子的波粒二象性及干涉效应制作的原子陀螺仪,又称量子陀螺仪,因其优于机械

陀螺与光纤陀螺等其他陀螺仪的零度漂移性能,作为新型惯性导航的重要元器件也被应用到量子导航定位系统中。

### 3.2 星基量子导航系统

MIT 的 Giovannetti 博士最早提出的脉冲式量子定位思想<sup>[38-39]</sup>可以通过图6所示理想化实验结构示意图进行说明。

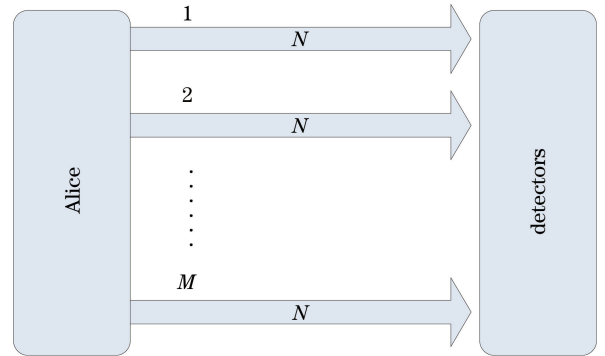


图6 理想化实验结构示意图

Fig. 6 Sketch of the idealized experiment

图6中 Alice 作为待测点,Detectors 是由已知不同位置的  $M$  个检测器组成的信号接收点,在实验过程中,Alice 向每一个检测器发送相同频谱(脉冲的带宽)以及功率(每个脉冲所包含的光子数  $N$ )的脉冲,因此各组脉冲具有频率纠缠性及强相关性,通过测量信号到达各检测器的平均时间可以获取待测点 Alice 的具体位置。在相同的理想通信通道中, $M$  个检测器记录的到达时间具有相互纠缠特性,这使计算得到的平均时间的精度提高了  $\sqrt{M}$  倍,提升因子  $\sqrt{M}$  是与相同带宽条件下的非频率纠缠脉冲相比得到的;每组脉冲均包含  $N$  个纠缠态光量子,测量时可以获得  $\sqrt{N}$  倍的精度提高,提升因子  $\sqrt{N}$  是与量子数目同样为  $N$  的经典相干态下的脉冲相比得到的;由此可知,在 Alice 端发射  $M$  组频率相互纠缠且结合了光子压缩的脉冲信号进行关联测量,综合后最终可获得  $\sqrt{MN}$  倍的精度提高。

自 MIT 提出脉冲式量子定位以来,作为导航系统中重要的定位、授时功能的体现,基于量子纠缠及量子压缩特性的光子脉冲测距和测时等相关研究就不断被报道。

2002年,Giovannetti 博士在提出 QPS 概念的同时,设计并验证了基于量子时钟同步消色散的“Conveyor belt clock synchronization”方案<sup>[40]</sup>,证明在光量子可能传播的一般条件下,时钟的同步性不受分散介质存在的干扰,提高了量子定位精度。

2004年美国马里兰大学 Valencia 等<sup>[41]</sup>报道了一项关于远距离二阶关联时钟同步的验证实验,通过半波片改变 BBO 晶体制备的纠缠态光源中的信号光和闲置光的方向,经过不同光纤路径,得到不同传输路径的精确时间差,最终得到皮秒级高精度时域。

同年,美国陆军研究实验室(ARL)Bahder<sup>[42]</sup>结合传统卫星定位思想与光子纠缠脉冲干涉式测距技术,率先提出了可以实现空天定位的星基量子导航系统的设计方案。六个位置已知的卫星两两组合的三条基线组成了该 QPS 的基本架构,卫星恰好位于一个双曲面的两个焦点,用户处于由基线组成的双曲面的交点位置。其中一条基线的具体工作方式如图 7 所示。

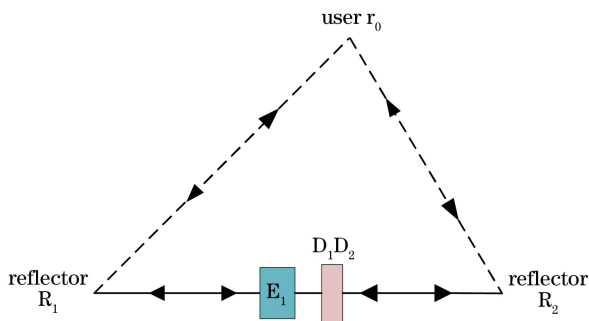


图 7 量子导航系统中的一个基线

Fig. 7 One baseline in the quantum positioning system

图 7 中,  $E_1$  包含纠缠光子源和 50:50 分束器等装置,  $D_1$ 、 $D_2$  为两个可校准的光学延迟探测器, 实验中  $E_1$  处产生的带有频率纠缠特性的双光子对分别向基线两端的参考卫星传播, 经过  $R_1$  与  $R_2$  的反射之后到达用户位置, 即待测点, 二次反射之后重新到达  $E_1$  处的 HOM 干涉仪; HOM 干涉仪对双光子纠缠源的二阶关联性进行测量, 可以获得光子经两个不同路径传播的时间差, 与传统卫星定位测距方式类似, 由三个到达时间差就可以确定用户的三维位置坐标。此外, 通过另外两个卫星构成的基线对, 可以确定用户的空时坐标。该 QPS 中用于测量时差的光子符合计数器, 即 HOM 干涉仪, 降低了对用户时钟稳定性的要求, 同时对光子二阶关联性的测量所得的时间相比传统电磁波测量更为精确, 报道指出在忽略其他外因对该基线干涉式 QPS 影响的条件下, 仿真计算结果表明, 定位的标准偏差可低于 1 cm。

2008 年, Villorresi 等<sup>[43]</sup>建立了从低轨道(LEO)卫星到地球上接收机的量子通信信道, 用以研究发

射脉冲的光学损耗和定时问题, 通过链路预算方程, 得到单向链路损耗预计低于 20 dB, 从而实现单光子信道状态, 在实验基础上明确地证明了基于卫星的量子通道的可行性。

2011 年, Ben-Av 等<sup>[44]</sup>指出量子时钟只有在 N 粒子限制在 W 态的情况下才能实现真正同步, 并引入 W 的泛化状态——Z 态, 设计出一个最优化的多方位量子时钟同步方案, 但方案中 W 态的制备太过困难, 目前未能实现。

2012 年, Lopez-Mago 等<sup>[45]</sup>利用迈克耳孙干涉仪对共线下转换光子对的干扰进行了完整描述, 实验中通过调整干涉仪中反射镜的位置与角度来改变纠缠光子对的传输路径, 经过偏振分束器与带通滤波器的分析计算, 得到相干长度可达  $3.3 \mu\text{m}$ 。

在我国, 量子理论与量子力学等学科蓬勃发展, 关于量子定位技术的研究也不断被报道。张欢阳等<sup>[7]</sup>最早就量子定位系统的基本原理、潜在优势、主要缺陷等作了介绍, 从“导航战”的角度对我国量子导航未来的发展提出了观点。许方星等<sup>[8]</sup>阐述了量子导航的基本原理与优势特点, 重点介绍了其关键技术及未来前景。

在星基量子定位系统的测距与测时方面, 崔怡等<sup>[46]</sup>基于纠缠量子对二阶量子相干的定位和时钟同步的基本原理, 给出了量子定位系统的初步方案, 通过对四个量子传输通道同时进行二阶量子相干测量, 精确确定用户在一个坐标系中的时空四维坐标。丛红璐等<sup>[47]</sup>在非旋波近似下, 对 Tavis-Cummings 模型的能谱和量子纠缠进行了精确求解, 指出随着耦合强度增大, 出现纠缠死亡现象; 肖俊俊等<sup>[48]</sup>阐述了量子导航中的关联测量理论, 依据量子纠缠高性能的抗干扰与抗噪能力, 分别从量子纠缠光测距与高亮度量子纠缠光源时钟同步测时两个方面进行了实验方案设计, 根据关联测量的数据处理算法, 得到了高精度的时空误差。翟淑琴等<sup>[49]</sup>提出了一种利用线性光学基本元件进行双通道混合纠缠态操控的方案, 分析了最终产生的两组混合纠缠态与初始混合纠缠态的保真度, 结果表明, 利用可调分束器(VBS)可以实现双通道混合纠缠态的操控, 为量子信息过程中信息的存储、传递、测量等提供了参考。杨春燕等<sup>[50]</sup>针对部分纠缠态在提高稳健性的同时会降低测量精度的问题, 提出了多结构分组纠缠方法, 在光子分组数与量子纠缠度之间选择不同配对, 通过对比总体测量精度增益的多个仿真结果, 确定使到达时间测量的总体性能最优的组合。王希

等<sup>[51]</sup>利用双模压缩光束对应正交分量在同步时关联性最大的性质,设计了基于双模压缩态和平衡零拍探测的量子测距方案,并进行了相应的理论证明和原理性仿真验证。

此外,杨春燕等<sup>[52]</sup>基于 Thomas 博士提出的干涉式星基定位系统,详细分析了其运作机理,利用数值分析和定位仿真建立了运算模型,根据其位置精度因子确定星座分布与定位误差的关系,验证了基线向量的线性无关度与基线相对于用户的张角是评判星座分布优劣的重要标准。李永放等<sup>[53]</sup>通过观察脉冲激光作用下的相互垂直偏振纠缠光子对的光谱特征,讨论了符合计数率和相干函数的特点,提出了随激光脉冲宽度的增加,纠缠光子对的相干性减小,量子定位的测量准确度降低的观点。王志刚等<sup>[54]</sup>基于基线干涉式量子定位原理,针对实时解算用户四维坐标的问题,提出了一种基于不动点迭代原理的近地空间航天器量子导航定位算法,并对其进行仿真,结果表明测量误差为  $1\ \mu\text{m}$  的条件下,定位精度可以达到  $1\ \text{cm}$ 。

另外,郭建军等<sup>[55]</sup>通过光子轨道角动量密码通信方案,介绍了光子轨道角动量在量子通信中的应用研究及展望。朱宇等<sup>[56]</sup>综述了量子密钥在地面与移动平台之间的分发所涉及的关键技术,介绍了移动量子密钥分发技术目前的发展状况与难点,并探讨了下一步实用化发展方向。从爽等<sup>[57-59]</sup>介绍了用以捕获、跟踪和对准信号的空间量子卫星信息通信(ATP)系统,详细阐述了量子通信链路的组成与工作机理,分析了 ATP 系统中捕获阶段和粗跟踪的相关技术,并给出了精度与性能指标,为量子通信通道的建立与信息的传输提供了充足的理论和实验分析,说明 ATP 是空地量子通信的一个关键技术。

### 3.3 量子惯性导航系统

以上列举的基于量子力学理论建立的量子导航定位系统与传统卫星导航类似,需要发射信号来实现用户四维坐标的定位,不同的是 QPS 采用的是相干关联的量子信号,仍旧属于有源定位系统。此外,上文提到的另一种基于量子惯性器件实现导航的量子定位系统,与传统惯性导航系统类似,靠自身惯性器件实现姿态调整与定位,不需要从在轨卫星实时接收信号进行测距和授时,属于无源定位系统。

这种无源量子导航系统传统的惯性导航系统在结构上基本一致,如图 8 所示,主要由三维原子陀螺仪、三维原子加速度计、原子钟和信号采集及处理单元四部分构成。

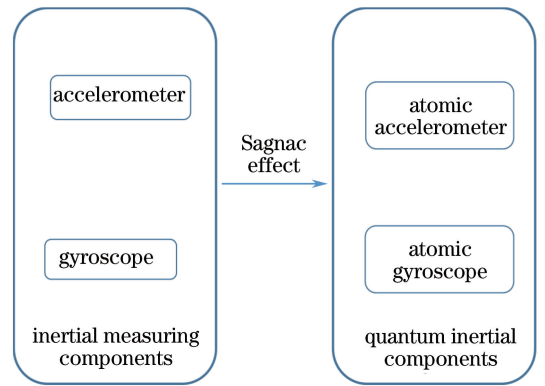
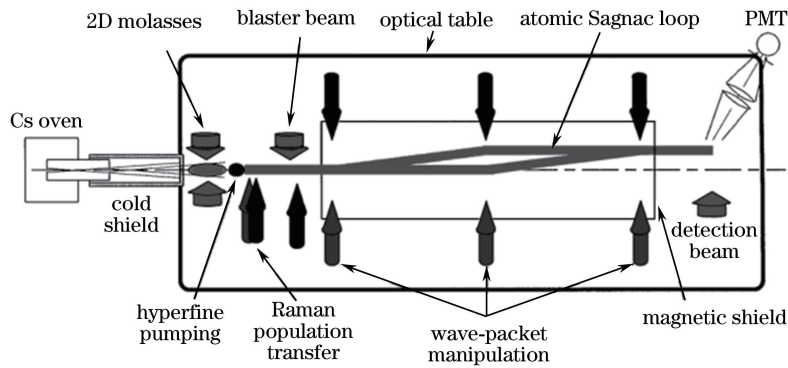


图 8 量子惯性导航系统

Fig. 8 Inertial navigation system based on quantum optics

作为惯性导航系统中最重要的一部分,原子陀螺仪与原子加速度计的研究目前是最受关注的,陀螺仪性能的优劣可以用其零度漂移与角速度灵敏度大小作为衡量标准。与传统陀螺仪测量方式不同,量子干涉陀螺仪基于原子的 Sagnac 效应,冷原子团以相反方向沿着相同的抛物线轨迹形成冷原子束,在拉曼激光刺激下,形成干涉环路,由于双环路原子干涉相移差的一半即为旋转速率引起的相移,进而可以提取旋转速率,其零度漂移理论值比传统陀螺仪低几个数量级。原子加速度计的精确测量同样是利用原子的 Sagnac 效应实现的,因此其发展轨迹与原子陀螺仪几乎一致。除干涉陀螺仪之外,利用碱金属原子自旋的拉莫尔进动可以实现角速度的传感,这类陀螺仪称为原子自旋陀螺仪。原子陀螺仪的具体工作机理在此不再赘述,下面通过原子陀螺仪的研究状况简要说明这一新型惯性导航技术的发展。

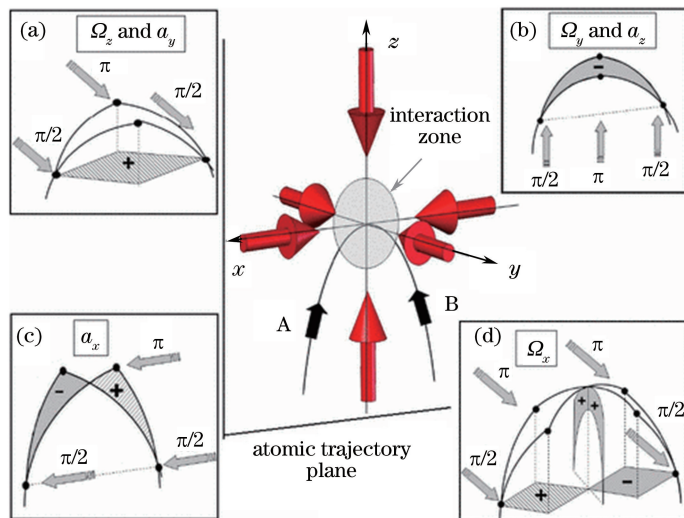
最近二十年,虽然对原子陀螺仪的研究依旧停留在样机实验阶段,但是欧美多国在原子自旋与干涉陀螺仪的研制与控制零度漂移方面均取得了各自的成果。1997 年,美国斯坦福大学 Kasevich 研究组首先演示了图 9 所示基于 Sagnac 效应的原子干涉陀螺仪<sup>[60]</sup>的工作原理,利用受激拉曼转换并操纵相干原子波包,实验中通过测量地球的旋转速率,得到短期灵敏度可达  $1.1 \times 10^{-6} (\text{°}) \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。2000 年<sup>[61]</sup>与 2009 年<sup>[62]</sup>,该小组对实验装置进行不断改进,且通过加强原子束流和噪声分离,提高了装置的测量稳定性;2011 年,该小组展示了一个四脉冲的冷原子干涉陀螺仪<sup>[63]</sup>,通过采用不对称的时间偏移脉冲序列来抑制与多路径干扰相关的杂散噪声,克服了以前原子干涉陀螺仪的精度和动态范围限制,短期灵敏度达到了  $4.8 \times 10^{-6} (\text{°}) \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

图9 原子束干涉仪原理图<sup>[64]</sup>Fig. 9 Schematic of the atomic beam interferometer<sup>[64]</sup>

法国天文台 Landragin 小组在 2006 年基于先前关于噪声与波前畸变对精度影响的研究工作,研制了能同时实现三维角速度和加速度测量的冷原子干涉陀螺仪<sup>[65]</sup>,该装置可以发射沿抛物线反向传播的冷原子云,在三个正交方向上连续分别施加单个拉曼光束对组成的时间脉冲,进行三轴旋转和加速度的测量,并在 2009 年对实验参数进行优化,图 10 为六轴陀螺仪工作原理示意图,通过进一步降低实验温度,增加原子数目,有效地从旋转信号中去除加速度噪声,

从而达到了短期测量的量子投影噪声的极限<sup>[66]</sup>,最终稳定度达到了  $4.0 \times 10^{-3} (\text{°}) \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

德国 Rasel 小组研制了对抛双环路型冷原子干涉陀螺仪,如图 11 所示。该装置中经过二维冷却的铷原子沿水平方向抛出,经过空间分离的三脉冲拉曼光,得到干涉条纹,进一步分析拉曼光平行度对干涉条纹的影响,并以此寻找拉曼光束的倾斜角度,在 2012 年的实验中得到  $3.5 \times 10^{-5} (\text{°}) \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$  的短期灵敏度<sup>[68]</sup>。

图 10 六轴原子陀螺仪示意图<sup>[67]</sup>Fig. 10 Schematic of six-axis atom gyroscope<sup>[67]</sup>

美国在原子自旋陀螺仪研制领域独树一帜。2007 年,美国 Northrop Grumman 公司研制出第一台核磁共振陀螺仪样机,经过 2010 年和 2012 年两次对样机的改进,其零偏漂移优于  $0.05 (\text{°})/\text{h}^{[70]}$ 。图 12 简单描述了核磁共振陀螺(NMRG)的工作原理,通过腔室中碱金属与稀有气体的自旋交换光抽运获得净磁矩,拉莫尔频率为  $\omega_{Xe}$ ,当装置转动时其进动频率为  $\omega_L$ ,  $\omega_L = \omega_{Xe} + \omega_R$ ,之后通过观测可得

角速率  $\omega_R$ 。

国内陆璇辉等<sup>[71-72]</sup>针对原子干涉的 Sagnac 效应、量子干涉陀螺仪的工作机理及原子干涉在高精度测量中的优势等方面进行了介绍。在原子陀螺仪的研制方面,中科院武汉物理与数学研究所李润兵等<sup>[9]</sup>利用拉曼激光脉冲相干操作双向对抛的冷原子,通过调节光束频率和冷却光的参数及控制冷原子轨迹,消除了初始相位对角速度测量的干扰,观察



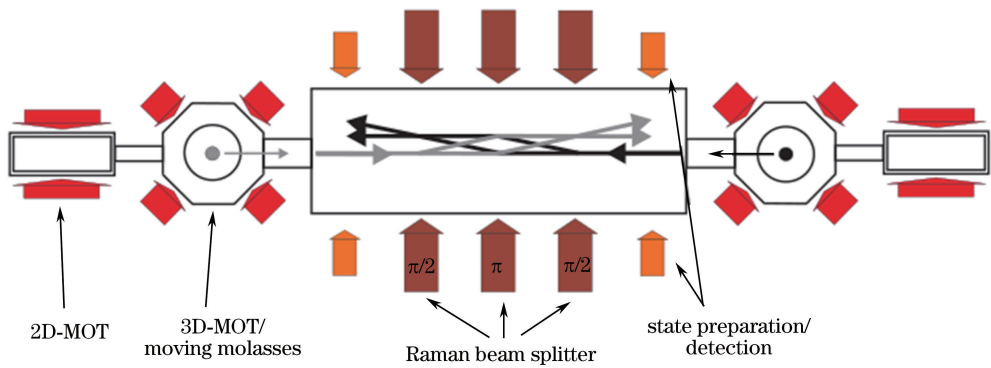
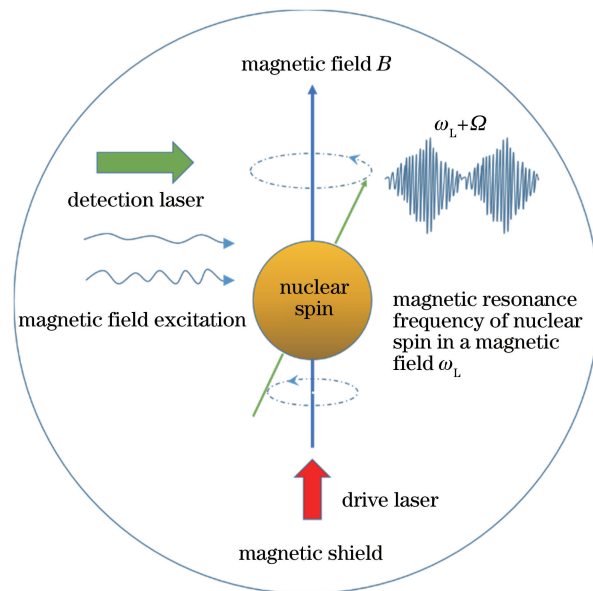
图 11 双环原子陀螺仪顶视图<sup>[69]</sup>Fig. 11 Top view of dual-loop atom gyroscope<sup>[69]</sup>

图 12 核磁共振陀螺原理

Fig. 12 Principle of nuclear magnetic resonance gyroscope

双环路冷原子干涉条纹,为冷原子陀螺仪的研制奠定了理论基础。清华大学薛洪波等<sup>[73]</sup>采用磁光阱冷却技术捕获到低速连续且单色性好的冷原子团,利用该原子束源技术实现的原子陀螺仪,短期灵敏度可以达到  $4.4 \times 10^{-3} (\text{°}) \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。王锴等<sup>[74]</sup>针对原子干涉测量中的噪声和系统误差进行评估,设计了空间分离的拉曼光干涉方案,实验得到短期灵敏度为  $6.8 \times 10^{-4} (\text{°}) \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ,在 2000 s 时稳定度可达  $0.06 (\text{°})/\text{h}$ 。在超冷原子量子模拟方面,中国科学技术大学潘建伟等<sup>[75]</sup>于 2014 年利用拉曼耦合技术,人工合成了自旋—轨道耦合的超冷铷原子玻色气体,首次在实验中成功确定自旋—轨道耦合玻色气体在有限温度下的相图;2017 年<sup>[76]</sup>实现了具有精确可控的  $C_4$  对称性的超冷原子高维自旋轨道耦合,在任意晶格和拉曼耦合强度下

呈现宽拓扑区域,寿命长达数秒,为进一步研究具有新颖拓扑结构的奇异量子现象铺平了道路。

目前,我国在原子自旋陀螺仪的研制方面进展较快,楚忠毅等<sup>[77]</sup>利用原子自旋陀螺仪核自旋磁场自补偿动力学方程和仿真实验,开发了稳定性好、实时性强的原子自旋陀螺仪核自旋磁场自补偿系统,可实时有效地跟踪核自旋磁场自补偿点;周斌权等<sup>[78]</sup>制备了具有磁场噪声抑制作用的异形加热膜,使高频正弦波作为加热驱动信号,构建了碱金属气室集成化无磁电加热单元。经验证,系统的等效磁场噪声优于  $17 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$ ,气室内部的温度稳定度优于  $\pm 0.006 \text{ °C}$ ,为原子自旋陀螺仪的性能提升提供了可靠保障。2017 年,为了进一步提高核磁共振陀螺仪的灵敏度水平<sup>[79]</sup>,对线性光旋转角度检测进行误差分析和实验研究。理论分析和实验表明消光比

$\sigma_2$  和直流偏置是差分检测方法中产生检测噪声的因素。中国航天科工三院 33 所秦杰等在 2016 年取得了重大突破,项目组攻克了核自旋-电子自旋耦合极化与检测等精密量子操控技术,成功研制我国首个基于量子技术的核磁共振陀螺样机,样机零偏漂移优于  $2(^{\circ})/h^{[80]}$ ,使我国成为世界上继美国之后第二个掌握该技术的国家,进一步缩小了与美国的技术差距。2017 年,针对线圈的磁场均匀性下降问题,提出了磁场等效增益系数,模拟磁屏蔽边界对线圈磁场的影响,据此建立了磁屏蔽边界条件下高均匀磁场线圈模型,优化了线圈参数<sup>[81]</sup>。此外,国防科技大学易鑫等<sup>[82]</sup>、西安飞行控制所李攀等<sup>[83]</sup>分别从原子气室温度控制和陀螺仪多层磁屏蔽罩结构等方面为核磁共振陀螺仪的整体设计和制造提供了理论依据和参考。

## 4 量子导航的优点

### 4.1 测量精度更高

无论是有源量子定位系统还是无源量子定位系统,与传统有源卫星导航和惯性导航系统相比均具有更高的测量精度。

对基于量子纠缠和量子压缩的星基空天量子定位系统来说,频率相干关联的多脉冲信号及信号中大量压缩的光子为用户时空坐标的测量精度带来了  $\sqrt{MN}$  倍的提高,突破了受限于海森堡测不准原理的传统测量极限。在量子理论不断发展的今天,其测量技术也不断改进与完善,可以预测今后的量子测量精度会取得进一步突破。

就无源量子定位系统而言,由于其结构包括量子陀螺仪、量子加速度计、原子时钟等,基于原子物质波的干涉效应与原子自旋的传感测量具有高灵敏度和极低零偏漂移的优点,与传统惯导系统相比,测量精度更高,误差更小,对载体姿态改变的检测灵敏度更高。随着相关量子理论及误差分析模型的完善,该 QPS 技术将作为新一代惯性导航系统开拓广阔的应用空间。

### 4.2 保密通信安全性能更强

量子遵循测不准原理与不可克隆原理,即未知的量子态无法进行测量,且量子态不可被精确复制。此外,将量子定位系统与量子密钥协议相结合<sup>[84]</sup>,在实现信息保密处理的同时提高了量子定位系统的安全性。

基于此,在 QPS 光子脉冲的传输过程中,即使部分纠缠态光子丢失或被窃取,窃听者所得的测量

结果是随机的、无效的,无法根据这些光子来获取定位点的位置坐标。此外,一旦窃听者截获了传输信号,则破坏了原有的量子态,由于量子纠缠的非局域性和关联特性,系统会得到与初始量子信息不对应的计算结果,这可以用来检测通道是否被监听;同时,系统可以通过更换通信频率或通道而继续正常工作。

基于量子惯性器件的新一代惯导技术本身就是无源定位系统,不依赖外界信息,隐蔽性好,保密性与安全性具有无可比拟的优势。随着降噪与抗干扰技术的提升,该系统的自主导航能力将得到进一步增强。

## 5 量子导航面临的问题

尽管量子导航的概念自提出后一直备受关注,并且近些年来成为导航领域研究热点,但是从实验结果来看,进展并不迅速,主要面临以下问题。

1) 理想光量子纠缠源的制备比较困难。纠缠态的制备过程经历了离子阱、腔量子电动力学、自发参量下转换等制备方式的改进,虽然目前的制备方案不断改善,产生光子对的效率及纯度逐渐提高,但是距离获得较为理想的高亮度纠缠源还有一段路程,而纠缠源的制备直接影响光子脉冲信号的质量优劣,这对量子精确测量技术的实现至关重要,因此理想纠缠源制备困难成为制约量子导航系统发展的关键因素。

2) 配套量子器件的研制并不成熟。经过纠缠源制备的量子信号通常比较脆弱,且纠缠特性易受外界环境的干扰,需要在信号的处理、传输、储存过程中谨慎对待,尤其是在处理阶段,由于信号相对微弱,需要高灵敏度信号接收器进行信号的捕获与处理,该类型的高性能量子器件目前还没有研制成功。

此外,QPS 研究多处于实验阶段,没有建立完善的系统级标准框架,在关键部件(角反射器、HOM 干涉仪、光子计数器等)和纠缠源制备、消噪处理、导航系统基线布置等关键技术方面选择不一,一定程度上阻碍了实验的重复性和进一步发展。对于量子无源定位系统,高灵敏度和低零偏漂移的原子陀螺仪和加速度计一直处于实验摸索阶段,只有少数几个国家在此领域取得突破,进展相对缓慢。

值得一提的是,中国科学技术大学潘建伟教授团队在量子通信方面多年保持着世界顶尖地位,该课题组于 2005 年在实验中实现了自由空间纠缠光子对 13 km 的分布距离和密钥分发,这一距离首次远大于

大气层的有效厚度,验证了全球量子卫星通信的可行性,之后开展的一系列后续实验都为发射量子卫星奠定了技术基础<sup>[85]</sup>。2017年,他们开发并发射了一颗低地球轨道卫星,用于实现诱饵态量子密钥分发,首次报道了超过1200 km距离尺度的卫星—地面量子通信实验,为量子态传输建立了可靠和有效的空对地链路<sup>[86-87]</sup>。2016年8月,我国成功发射了世界首颗量子科学实验卫星“墨子号”,使我国在世界上首次实现卫星和地面之间的量子通信,进而构建天地一体化的量子保密通信与科学实验体系。

## 6 结束语

21世纪是信息时代,随着量子理论的深入研究,正在步入量子信息时代,也将带来一场PNT革命。基于量子理论的量子导航作为新型导航定位技术,具有传统导航定位技术难以比拟的定位与授时优势,精度更高,误差更小,抗干扰能力更强,特别是在安全性与保密性方面具有重要的战略价值,近些年来受到世界各国的重视,越来越多的科研人员投入相关研究之中。

由于目前的QPS技术还没有成熟,在发展QPS技术的同时应当吸取其他导航系统建设的经验,并且考虑将量子导航与卫星导航、惯性导航及无线电导航结合共同构建组合导航系统,实现优势互补,更好地发挥各系统的定位优势。

现今,我国在量子学科积累了大量的理论与实验基础,培养了大批科研人才,不过仍然需要进行更多的新技术预研,针对量子导航定位系统面临的关键问题及重要部件进行更多的实验验证与自主研制,尽快完成从研究到应用的转换,争取走在量子定位技术领域的前沿,实现导航领域的跨越式发展。

## 参 考 文 献

- [1] Horodecki R, Horodecki P, Horodecki M, *et al.* Quantum entanglement [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(2): 865-942.
- [2] Terhal B M. Detecting quantum entanglement [J]. *Theoretical Computer Science*, 2002, 287(1): 313-335.
- [3] Walls D F. Squeezed states of light [J]. *Nature*, 1983, 306(5939): 141-146.
- [4] Yu Z R. Non-classical states in the quantum optics [J]. *Progress in Physics*, 1999, 19(1): 72-95.  
于祖荣. 量子光学中的非经典态[J]. *物理学进展*, 1999, 19(1): 72-95.
- [5] Peng K C. Squeezed state entanglement and continuous variable entanglement swapping [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(12): 7-8.  
彭堃堃. 压缩态纠缠与连续变量纠缠交换 [J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(12): 7-8.
- [6] Zou H X. The inertial navigation technology of next generation: quantum navigation [J]. *National Defense Science & Technology*, 2014, 35(6): 19-24.  
邹宏新. 新一代惯性导航技术: 量子导航 [J]. *国防科技*, 2014, 35(6): 19-24.
- [7] Zhang H Y, Zhang G J, Lin X P. The future of GPS-quantum positioning system [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2004, 24(5): 40-43.  
张欢阳, 张冠杰, 林象平. GPS的未来: 量子定位系统 [J]. *舰船电子工程*, 2004, 24(5): 40-43.
- [8] Xu F X. Introduction of the quantum positioning system and its application [J]. *Science & Technology Information*, 2014, 12(22): 7.  
许方星. 简析量子定位技术及应用前景 [J]. *科技资讯*, 2014, 12(22): 7.
- [9] Li R B, Wang J, Zhan M S. New generation inertial navigation technology: cold atom gyroscope [J]. *GNSS World of China*, 2010, 35(4): 1-5.  
李润兵, 王谨, 詹明生. 新一代惯性导航技术: 冷原子陀螺仪 [J]. *全球定位系统*, 2010, 35(4): 1-5.
- [10] Wang J H, Shi W P. The application system and policy of foreign satellite navigation and positioning system [J]. *China Surveying and Mapping*, 2010(1): 40-43.  
王杰华, 石卫平. 国外卫星导航定位系统的应用体制及政策 [J]. *中国测绘*, 2010(1): 40-43.
- [11] Zhou N. How does GPS determine the orientation [J]. *Science World*, 2012(2): 22-25.  
周楠. GPS如何测定方位 [J]. *科学世界*, 2012(2): 22-25.
- [12] Wang W G, Tang S H. Conspectus of GPS surveying errors [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2006, 29(5): 39-42.  
王文贯, 唐诗华. GPS卫星定位误差概论 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2006, 29(5): 39-42.
- [13] Zhang S X, Sun J. Strapdown inertial navigation system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1992.  
张树侠, 孙静. 捷联式惯性导航系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
- [14] Zhou X C, Shen J S. Development of inertial navigation technology and its applications [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2006, 25(9): 55-

56.  
周徐昌, 沈建森. 惯性导航技术的发展及其应用[J]. 兵工自动化, 2006, 25(9): 55-56.
- [15] Dong J W. Analysis on inertial navigation technology [J]. Instrumentation Technology, 2017(1): 41-43.  
董进武. 惯性导航技术浅析[J]. 仪表技术, 2017(1): 41-43.
- [16] Xiong B F. Research on the modeling and correction technology of random drift error of low cost MEMS gyroscope [D]. Chongqing: Southwest University, 2017.  
熊必凤. 低成本 MEMS 陀螺仪随机漂移误差的建模及修正[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [17] Wang X L. Inertial navigation foundation [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2013: 67-70.  
王新龙. 惯性导航基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013: 67-70.
- [18] Ma J J, Li W Q, Zheng Z Q. Analyzing and modeling for stochastic error of MIMU [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2007, 29(4): 483-486.  
马建军, 李文强, 郑志强. MIMU 随机误差分析与建模[J]. 压电与声光, 2007, 29(4): 483-486.
- [19] Du X J, Zhai J Y. Summary of micro inertial navigation technology based on MEMS [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(9): 77-81.  
杜小菁, 翟峻仪. 基于 MEMS 的微型惯性导航技术综述[J]. 飞航导弹, 2014(9): 77-81.
- [20] Syed Z F, Aggarwal P, Goodall C, *et al.* A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems [J]. Measurement Science & Technology, 2007, 18(7): 1897-1907.
- [21] Zhang Q, Wang W, Wang L, *et al.* Research on random errors of fiber optic gyro based on dynamic Allan variance and algorithm improvement[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0406003.  
张谦, 王玮, 王蕾, 等. 基于动态 Allan 方差的光纤陀螺随机误差分析及算法改进[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0406003.
- [22] Zhang N, Li X Y. Research on theoretical improvement of dynamic Allan variance and its application[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1106003.  
张娜, 李绪友. 动态 Allan 方差的理论改进及其应用研究[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1106003.
- [23] Li X Y, Hu M, Zhang P, *et al.* Applying overlapping Allan variance theory to better stochastic modeling of microgyro [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 25(2): 225-229.  
李晓莹, 胡敏, 张鹏, 等. 交叠式 Allan 方差在微机械陀螺随机误差辨识中的应用[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(2): 225-229.
- [24] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Quantum-enhanced positioning and clock synchronization [J]. Nature, 2001, 412(6845): 417-419.
- [25] Schrödinger E. The current situation in quantum mechanics (1935) [M]. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 1984: 98-129.
- [26] Sackett C A, Kielpinski D, King B E, *et al.* Experimental entanglement of four particles [J]. Nature, 2000, 404(6775): 256-259.
- [27] Hagley E, Maître X, Nogues G, *et al.* Generation of Einstein-Podolsky-Rosen pairs of atoms [J]. Physical Review Letters, 1997, 79(1): 1-5.
- [28] Shih Y H, Alley C O. New type of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm experiment using pairs of light quanta produced by optical parametric down conversion [J]. Physical Review Letters, 1988, 61(26): 2921-2924.
- [29] Niu X L. Preparation and application of entangled photons [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.  
牛孝灵. 纠缠光子的制备和应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [30] Wu H, Wang X B, Pan J W. Quantum communication: status and prospects [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2014, 44(3): 296-311.  
吴华, 王向斌, 潘建伟. 量子通信现状与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(3): 296-311.
- [31] Zhao Z, Yang T, Chen Y A, *et al.* Experimental test of quantum nonlocality in four-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement [J]. Physics, 2003, 91(18): 11173-11186.
- [32] Zhao Z, Chen Y A, Zhang A N, *et al.* Experimental demonstration of five-photon entanglement and open-destination teleportation [J]. Nature, 2004, 430(6995): 54-58.
- [33] Lu C Y, Zhou X Q, Gühne O, *et al.* Experimental entanglement of six photons in graph states [J]. Nature Physics, 2007, 3(2): 91-95.
- [34] Yao X C, Wang T X, Xu P, *et al.* Observation of eight-photon entanglement [J]. Nature Photonics, 2012, 6(4): 225-228.
- [35] Wang X L, Chen L K, Li W, *et al.* Experimental ten-photon entanglement [J]. Physical Review

- Letters, 2016, 117(21): 210502.
- [36] Xu J Q, Lou Q H, Ning D, *et al.* Second order quantum correlation in stimulated Raman scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(9): 70-73.  
徐剑秋, 楼祺洪, 宁东, 等. 受激拉曼散射中的二阶量子关联[J]. *光学学报*, 1997, 17(9): 70-73.
- [37] The UK developed the quantum navigation positioning system: the QPS accuracy is higher than that of GPS [EB/OL]. (2014-05-19) [2018-01-08]. <http://scitech.people.com.cn/n/2014/0519/c1057-25032697.html>.  
英国研制量子导航定位系统 QPS 精确度比 GPS 更高 [EB/OL]. (2014-05-19) [2018-01-08]. <http://scitech.people.com.cn/n/2014/0519/c1057-25032697.html>.
- [38] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Advances in quantum metrology [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(4): 222-229.
- [39] Maccone L, Giovannetti V. Quantum metrology: beauty and the noisy beast [J]. *Nature Physics*, 2011, 7(5): 376-377.
- [40] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L, *et al.* Conveyor-belt clock synchronization [J]. *Physical Review A*, 2004, 70(4): 043808.
- [41] Valencia A, Scarcelli G, Shih Y. Distant clock synchronization using entangled photon pairs [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(13): 2655-2657.
- [42] Bahder T B. Quantum positioning system [C] // 36th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 2005: 423-427.
- [43] Villoresi P, Jennewein T, Tamburini F, *et al.* Experimental verification of the feasibility of a quantum channel between space and Earth [J]. *New Journal of Physics*, 2008, 10(3): 033038.
- [44] Ben-Av R, Exman I. Optimized multiparty quantum clock synchronization [J]. *Physical Review A*, 2011, 84(1): 014301.
- [45] Lopez-Mago D, Novotny L. Coherence measurements with the two-photon Michelson interferometer [J]. *Physical Review A*, 2012, 86(2): 023820.
- [46] Luo Y, Jiang E C. Positioning and clock synchronization based on second-order quantum coherence [J]. *Modern Navigation*, 2012, 3(6): 456-461.  
雒怡, 姜恩春. 基于二阶量子相干的定位与时钟同步方法 [J]. *现代导航*, 2012, 3(6): 456-461.
- [47] Cong H L, Ren X Z. Exact solutions of energy spectrum and quantum entanglement in Tavis-Cummings model [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 092701.  
丛红璐, 任学藻. Tavis-Cummings 模型的能谱和量子纠缠的精确解 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 092701.
- [48] Xiao J J. Research of measuring technology based on quantum navigation and position [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014: 16-36.  
肖俊俊. 量子导航定位中的测量技术实验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014: 16-36.
- [49] Zhai S Q, Zhang Y. Duplex hybrid entanglement manipulation based on linear optics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1112002.  
翟淑琴, 张姚. 基于线性光学的双通道混合纠缠操控 [J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1112002.
- [50] Yang C Y, Wu D W, Yu Y L, *et al.* Enhancement of the time of arrival measuring by utilizing multi-structured grouped-entangled quantum pulse [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2011, 34(6): 33-37.  
杨春燕, 吴德伟, 余永林, 等. 量子多结构分组纠缠到达时间测量增强方法 [J]. *北京邮电大学学报*, 2011, 34(6): 33-37.
- [51] Wang X, Chen S X, Wu D W, *et al.* Quantum ranging scheme based on two-mode squeezing light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0727001.  
王希, 陈树新, 吴德伟, 等. 双模压缩光量子测距方案 [J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0727001.
- [52] Yang C Y, Wu D W, Yu Y L, *et al.* Research on optimal constellation distribution of interferometric quantum positioning system [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2009(12): 1-6.  
杨春燕, 吴德伟, 余永林, 等. 干涉式量子定位系统最优星座分布研究 [J]. *测绘通报*, 2009(12): 1-6.
- [53] Li Y F, Wang Z H, Li B H, *et al.* Experimental scheme design and analysis for the quantum spatial positioning with pulse laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(10): 1811-1815.  
李永放, 王兆华, 李百宏, 等. 脉冲激光作用下的量子定位实验方案的设计及分析 [J]. *光子学报*, 2010, 39(10): 1811-1815.
- [54] Wang Z G, Yang X, Deng Y F. Research on the near-earth spacecraft quantum positioning determinacy algorithm [J]. *Flight Dynamics*, 2015, 33(6): 551-554.  
王志刚, 杨绚, 邓逸凡. 近地空间航天器量子导航定位算法 [J]. *飞行力学*, 2015, 33(6): 551-554.

- [55] Guo J J, Guo B H, Cheng G M, *et al.* Research progress on photon orbital angular momentum in quantum communication applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 080003.  
郭建军, 郭邦红, 程广明, 等. 光子轨道角动量在量子通信中应用的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(8): 080003.
- [56] Zhu Y, Shi L, Wei J H, *et al.* Progress in mobile quantum key distribution technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 120004.  
朱宇, 石磊, 魏家华, 等. 移动量子密钥分发技术进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 120004.
- [57] Cong S, Wang H L, Zou Z S, *et al.* Techniques of acquisition and coarse tracking in the quantum navigation and positioning system [J]. *Aerospace Control and Application*, 2017, 43(1): 1-10.  
丛爽, 汪海伦, 邹紫盛, 等. 量子导航定位系统中的捕获和粗跟踪技术 [J]. *空间控制技术与应用*, 2017, 43(1): 1-10.
- [58] Jiang H, Wang J Y, Jia J J, *et al.* The design and research of coarse tracking system for space quantum communication [J]. *Optical Communication Technology*, 2012, 36(6): 43-46.  
江昊, 王建宇, 贾建军, 等. 空间量子通信粗跟踪系统设计研究 [J]. *光通信技术*, 2012, 36(6): 43-46.
- [59] Lin J Y, Wang J N, Zhang L, *et al.* Research on high-bandwidth technology for quantum communication ATP system [J]. *Optical Communication Technology*, 2010, 34(7): 57-59.  
林均仰, 王建宇, 张亮, 等. 高带宽量子通信信标跟踪技术研究 [J]. *光通信技术*, 2010, 34(7): 57-59.
- [60] Gustavson T L, Bouyer P, Kasevich M A. Dual-atomic-beam matter-wave gyroscope [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3270: 62-69.
- [61] Gustavson T L, Landragin A, Kasevich M A. Rotation sensing with a dual atom-interferometer Sagnac gyroscope [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2000, 17(12): 2385-2398.
- [62] Durfee D S, Shaham Y K, Kasevich M A. Long-term stability of an area-reversible atom-interferometer Sagnac gyroscope [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(24): 240801.
- [63] Stockton J K, Takase K, Kasevich M A. Absolute geodetic rotation measurement using atom interferometry [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(13): 133001.
- [64] Gustavson T L, Bouyer P, Kasevich M A. Precision rotation measurements with an atom interferometer gyroscope [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(11): 2046-2049.
- [65] Canuel B, Leduc F, Holleville D, *et al.* Six-axis inertial sensor using cold-atom interferometry [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(1): 010402.
- [66] Gauguet A, Canuel B, Lévêque T, *et al.* Characterization and limits of a cold-atom Sagnac interferometer [J]. *Physical Review A*, 2009, 80(6): 063604.
- [67] Canuel B, Leduc F, Holleville D, *et al.* A cold atom interferometer for high precision inertial measurements [C] // 2004 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, 2004: 113-114.
- [68] Tackmann G, Berg P, Schubert C, *et al.* Self-alignment of a compact large-area atomic Sagnac interferometer [J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(1): 015002.
- [69] Müller T, Gilowski M, Zaiser M, *et al.* A compact dual atom interferometer gyroscope based on laser-cooled rubidium [J]. *The European Physical Journal D*, 2009, 53(3): 273-281.
- [70] Larsen M, Bulatowicz M. Nuclear magnetic resonance gyroscope [C] // 2012 IEEE International Frequency Control Symposium, 2012: 1-5.
- [71] Lu X H, Wang J F. Quantum gyroscope based on an atom interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 293-295.  
陆璇辉, 王将峰. 基于原子干涉的量子陀螺仪 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(3): 293-295.
- [72] Chen X, Zheng X T. Research progress and key technologies of interferometric atom gyroscope [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2013, 11(5): 65-70.  
陈霞, 郑孝天. 原子干涉陀螺仪关键技术与研究进展 [J]. *光学与光电技术*, 2013, 11(5): 65-70.
- [73] Xue H B, Feng Y Y, Chen S, *et al.* A continuous cold atomic beam interferometer [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(9): 094901.
- [74] Wang K, Yao Z W, Lu S B, *et al.* A new generation of inertial measurement instrument: Raman-type atom interferometric gyroscope [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2016, 33(5): 513-523.  
王锴, 姚战伟, 鲁思滨, 等. 新一代惯性测量仪器: 拉曼型原子干涉陀螺仪 [J]. *量子电子学报*, 2016, 33(5): 513-523.
- [75] Mandel T. Quantum manipulation of (ultra-) cold atom systems for information processing [D].

- Heidelberg: Ruperto-Carola University of Heidelberg, 2014.
- [76] Sun W, Wang B Z, Xu X T, *et al.* Long-lived 2D spin-orbit coupled topological Bose gas [EB/OL]. (2017-10-02)[2018-01-10]. <https://arxiv.org/abs/1710.00717>.
- [77] Chu Z Y, Sun X G, Wan S A, *et al.* Nuclear spin magnetic field self-compensation system for atomic spin gyroscope [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(11): 2579-2584.  
楚中毅, 孙晓光, 万双爱, 等. 原子自旋陀螺仪核自旋磁场自补偿系统[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2579-2584.
- [78] Zhou B Q, Hao J P, Liang X Y, *et al.* Experimental study on electromagnetic noise suppression of atomic spin gyroscope heating chamber [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(1): 36-42.  
周斌权, 郝杰鹏, 梁晓阳, 等. 原子自旋陀螺气室加热电磁噪声抑制实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(1): 36-42.
- [79] Yang D, Chen L, Jia Y C, *et al.* Noise suppression for the differential detection in nuclear magnetic resonance gyroscope[C]//Optoelectronics and Micro/Nano-Optics, 2017: 57.
- [80] <http://military.china.com/news/568/20160901/23442110.html>.
- [81] Wang C E, Qin J. Design method of high uniform magnetic coil for nuclear magnetic resonance gyroscope [J]. Navigation Positioning & Timing, 2017, 4(1): 89-93.
- 王春娥, 秦杰. 核磁共振陀螺用高均匀磁场线圈设计方法[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(1): 89-93.
- [82] Yi X, Wang Z G, Xia T, *et al.* Research on temperature field in the vapor cell of nuclear magnetic resonance gyroscope [J]. Chinese Optics, 2016, 9(6): 671-677.  
易鑫, 汪之国, 夏涛, 等. 核磁共振陀螺中原子气室温度场的研究[J]. 中国光学, 2016, 9(6): 671-677.
- [83] Li P, Liu Y Z, Wang J L. Optimization design of multilayer magnetic shield for nuclear magnetic resonance gyroscopes [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(3): 383-389.  
李攀, 刘元正, 王继良. 核磁共振陀螺多层磁屏蔽系统优化设计[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(3): 383-389.
- [84] Wang Z Y. Security analysis of quantum cryptography [J]. China Science and Technology Information, 2016(19): 24-25.  
王占元. 量子保密通信安全性浅析[J]. 中国科技信息, 2016(19): 24-25.
- [85] Peng C Z, Yang T, Bao X H, *et al.* Experimental free-space distribution of entangled photon pairs over 13 km: towards satellite-based global quantum communication [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(15): 150501.
- [86] Liao S K, Cai W Q, Liu W Y, *et al.* Satellite-to-ground quantum key distribution [J]. Nature, 2017, 549(7670): 43-47.
- [87] Yin J, Cao Y, Li Y H, *et al.* Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers [J]. Science, 2017, 356(6343): 1140-1144.