



# 地球引力背景下的 卫星-地面量子时钟同步

王接词 田泽华 荆继良

(湖南师范大学物理与信息科学学院 410081)

原子钟是迄今为止人类能制造的最精密的设备,精确的定时和授时在导航、卫星定位、相对论效应的实验检测、引力波的探测等多个系统或科学计划中扮演了重要的角色。时钟同步事实上是一个比较经典的课题。对于这一问题,人们最熟悉的是两个经典时钟同步方案:爱因斯坦时钟同步方案和爱丁顿的慢钟搬运方案。现有的卫星定位系统的时钟同步用的是前者,人们利用激光或其他信息载体在标准钟和需要同步的钟之间交换固有时信息。具体说来,我们假设观测者甲所在的位置有一个标准钟,另一个观测者乙希望将自己的时钟与标准钟同步。甲向乙发射一束激光,乙利用其所在地的设备将这束光反射给甲。甲需要记录信息发射和接受的时间,而乙需要记录信号被反射的时间。然后甲和乙对各自时钟上记录的反射时间进行比对,从而知道两地固有时之间的差别,乙再根据比对结果对其时钟进行校准。

全球性的量子通信网络最终需要用卫星来实现,因此基于卫星的量子信息处理任务是量子信息研究的一个重要方向。近年来,卫星和地面之间的量子通信实验,比如量子密钥分发、准单光子传输、卫星和地面之间量子态的传输都已经在实验上实现。在星地之间的远距离量子信息实验研究中,时钟同步是一个必不可少的步骤、也是一个必须被考虑的问题。此外,卫星-地面量子时钟网络因为具有前所未有的稳定性和精确度,由于量子资源的引入其精度可以接近甚至突破标准量子极限,同时在安全性上也具有优势,因此基于卫星的量子时钟网

络被认为是未来的世界时钟方案。近年来,人们开始利用量子手段和量子器件来提高时钟同步的精度,发现量子纠缠和量子相干性等量子资源的引入会让同步精度获得较大的提升。

在量子时钟同步方案中,被定位或被同步的实验者需要向探测器或标准钟持续发送纠缠的激光脉冲(或微波信号),这是量子时钟同步方案与经典时钟同步方案最大的不同。接着,人们又实现了利用缓慢移动的镜子在光路中引入光程差来进行时钟同步的方案,发现量子纠缠的引入会让基于激光的平直时空量子时钟同步的精度获得较大的提升。但值得注意的是这些时钟同步方案都未考虑时空背景和相对论效应的影响,而对于基于卫星的远程时钟同步而言,这些影响是必须被考虑的。事实上,对于量子时钟同步,我们必须假设搬钟是在“绝热、极慢”和平直时空中进行的,这样相对论效应才可以忽略不计。然而,近年来人们通过实验观发现,对于原子钟而言,0.33米的高度改变或10m/s的运动速度都会导致原子钟的频率发生变化,因此对于量子时钟同步方案而言相对论效应不能被忽略。

最近,我们与中国科学院物理研究所的范桁研究员合作,提出了一个基于Hong-Ou-Mandel双光子干涉仪的量子时钟同步方案。在该方案中,卫星上的钟和地面上的钟的固有时信息通过移动的镜子被引入到干涉光束中,而固有时信息可以通过测量相干激光的巧合率来读取。经研究发现,由于激光束在卫星与地面之间传播时受到了地球引力的影响,光子的量子态同样也随之被改变。此外,激

光干涉仪的性能参数和卫星的高度被证明都是时钟同步过程中必须要考虑的重要因素。

如图1所示,两台具有相同运行精度的原子钟分别位于地球表面和卫星上,它们分别被命名为Alice和Bob。在它们之间有两束频率纠缠的激光脉冲交换,这两束激光分别命名参考光I和信号光S。为了将时间信息导入到光束中,实验者分别通过移动的镜子在信号光和参考光中引入光程差。假设卫星和地面上的反射镜都以约定的时刻开始和结束恒定速率移动,这样就可以均匀地在光束中增加和减少光程差。从理论上来说,如果卫星和地面上的时钟是同步的,那么引入的光程差也完全一样,最后看不到干涉条纹。但实际情况是,它们所在地点由于引力场强弱不一样,因此各自所在地的局域时钟的固有时读数存在差异。而实验者都是按约定在其当地时钟显示某一读数的时候开始移动反射镜。这导致卫星和地面上的镜子开始移动的时间实际上不一样,因此在两束光中引入的光程差也相应地不一样,而最后实际得到的光程差与两地各自的反射镜开始运动的固有时之差有关。因此,通过测量输出端光子的干涉情况,就能够获取

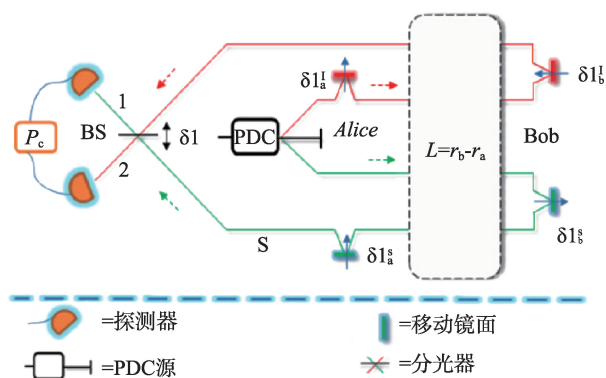


图1 卫星与地面之间量子时钟同步方案,图中PDC是激光光源,I代表参考光,S代表信号光,BS代表分束器。Alice位于地面基站, Bob位于卫星上,  $\delta l_a^s(\tau)$ 和  $\delta l_a^r(\tau)$ 分别代表Alice在信号光和参考光上引入的光程差

两臂中光程差的精确信息,也就获得了卫星和地面时钟间确切的固有时之差。

因为激光脉冲在卫星和地面站点间传播时会受到地球弯曲时空的影响,所以我们在描述星地间光子的传播时,必须要考虑地球引力背景的作用。由于引力场的存在,波包的接收会受到地球弯曲时空的影响,这种非局域的引力效应同时也会影响卫星和地面之间量子信道保真度,因而也必定会影响到时钟同步的精度。采用现有量子光学实验的仪器参数,通过计算可以得到在单次同步过程中,引力效应的修正会极大地影响授时精度,因此在未来的远距离量子信息处理和量子时钟同步任务中必须考虑这些修正。当前地球引力背景下的卫星-地面量子时钟同步的研究还处于理论研究阶段,对于这一问题我们还只考虑了地球质量产生的引力场对时钟同步精度的影响。在理论研究方面,地球的自转和所带电荷、潮汐力、多谱勒效应等多个因素对时钟同步精度的影响还需要进一步考虑,同时在更精确的固有时引入机制和采用更多的量子系统来进行时钟同步等方面都还有问题值得深入研究。

这项工作完成约一年以后,类似的量子时钟同步方案已经被国家授时中心的实验小组应用于地面的远程量子时钟同步实验中(Scientific Reports 6 (2016) 30453, arXiv:1602.06371)。该课题组的实验结果表明,地面上利用激光干涉仪进行的远程量子时钟同步精度可以达到73.2 ps。因此,如果将激光的传送距离拓展到卫星和地面之间的距离,在这样高的精度下研究引力效应对时钟同步精度的影响,其研究结果值得期待。事实上引力背景下的量子时钟同步及相关领域还有许多值得研究的问题,而对这些问题的深入研究不但可以极大丰富量子理论本身的内容,同时还可以促进广义相对论、量子场论与量子信息等相关学科的协调发展。