

面向空间应用的弱测量技术研究

冷晗阳

(钱学森空间技术实验室 空间技术与应用基础研究部, 北京 100094)

1 研究背景

近年来,量子技术已成为学术和工程应用的前沿热点研究领域,与经典技术相比,其在量子通信、量子计算和量子精密测量等方面具有绝对安全保密通信、超高速并行计算以及超越经典极限的测量和传感能力等优势。国外著名的高校和研究机构均成立了专门的量子技术研究中心,如美国哈佛大学、斯坦福大学、美国国家标准与技术研究院(NIST)、NASA的AMES实验室、洛斯阿拉莫斯国家实验室等,欧盟ESA、英国牛津大学、德国马普量子光学研究所等。国内,在量子科技领域也拥有多家世界级的实验室,较知名的有中国科学技术大学、清华大学、北京大学、山西大学、上海光机所、中科院物理所、航天九院十三所、核九院等。

量子通信方面,目前量子密钥分发已实现地基和天基的工程应用初步验证,但由于缺少量子中继器,信道损耗和背景噪声致使量子密钥分发的传输距离存在不可逾越的上限,同时也限制了在一定传输距离下量子密钥分发的传输码率。突破这一传输距离和码率的限制是目前量子密钥分发技术走向实用化过程中面临的一项巨大挑战。

量子计算方面,目前除全球各大学及研究所之外,美国的IBM、微软、谷歌、中国的阿里巴巴、日本NTT等公司均展开了量子计算机的研发。尽管目前多家公司已经制成了包含几十个量子比特的量子计算机样机,但是距离走向真正实用化还需要解决量子比特退相干、量子纠错以及量子算法等一系列难题。

量子精密测量技术利用了光子、原子等物质量子态的纠缠、叠加、压缩等非经典特性,从基本原理层面突破了传统测量技术的经典极限,提升了测量精度和灵敏度。其中研究历史较长,目前相对接近于实际应用的量子精密测量技术包括冷原子干涉重力仪和压缩态注入引力波干涉仪。更多的量子精密测量技术仍处于基础研究阶段,例如量子成像、量子光刻、海森堡极限相位测量等。量子精密测量技术依靠量子态的独特性质获得了测量精度等方面的提升,但同时由于量子态强度弱并且十分脆弱(易退相干),这反过来限制了大多数量子精密测量技术进一步走向实用。

脆弱的量子态不仅使得许多量子精密测量技术的实用性大打折扣,也同时阻碍了量子通信、量子计算的实用化进程。能否在基于经典态而不是量子态的情

形下仍然获得量子技术带来的绝对安全保密通信、超高速并行计算以及超越经典极限的测量和传感能力等一系列技术优势呢？在研究者长期探索下，近年来在一些量子技术领域已经一定程度上摆脱了量子态的这一束缚，例如：在量子密钥分发方面，利用多束弱激光构成的诱骗态光源代替单光子光源，人们成功地在保证绝对安全信息传输的同时提高了码率和传输距离；在量子成像方面，利用赝热光源等人工调制的经典光源代替纠缠光子，同样获得了与鬼成像类似的成像分辨率提升。而弱测量技术也是一种不依赖于量子态也能获得测量灵敏度提升的量子技术。

2 国内外研究现状

弱测量概念由 Y. Aharonov、D. Z. Albert 和 L. Vaidman 于 1988 年首次提出，通常量子算符的平均值均介于其最小本征值和最大本征值之间，而利用弱测量方式测得的弱值则打破了这一常规限制，由于这一不同寻常的特点，弱测量概念自提出后曾备受争议，而近 10 年来由于各类弱测量验证实验的不断涌现，弱测量技术获得了更广泛的关注。目前弱测量技术研究主要分为两个方面：一是在量子基础研究领域，用于量子态波函数的直接测量以及量子力学非经典特性的刻画；二是在精密测量领域，用于小信号的放大。本文中我们仅讨论弱测量技术在小信号放大方面的应用。

θ

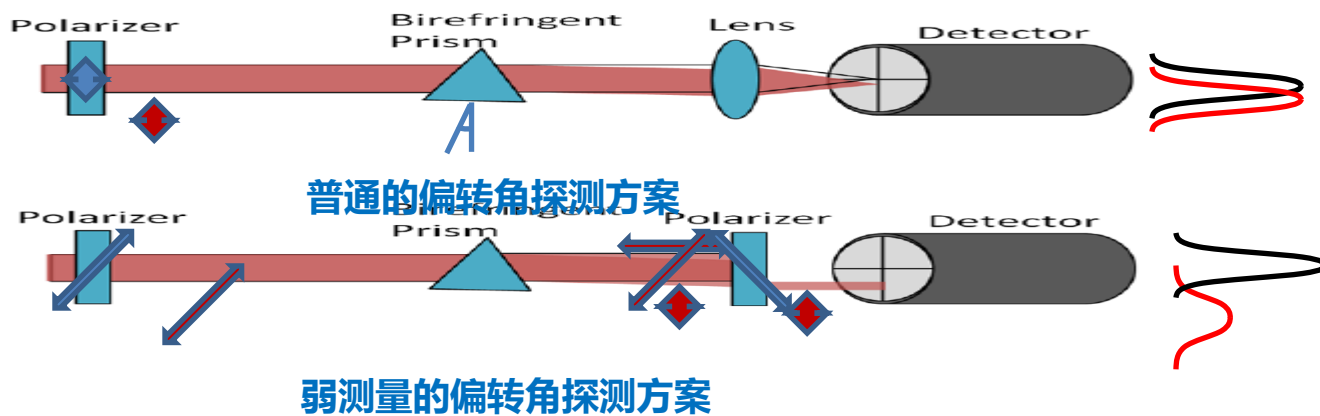


图 1 弱测量偏转角探测方案与普通方案的对比

弱测量的小信号放大基本原理可由图 1 中的偏转角探测方案来说明。设想我们的目标是测量一块双折射棱镜的偏转角度。通常情况下，我们可以发射一束线性偏振光透过双折射棱镜（光线偏振方向与棱镜双折射主轴之一一致，这里假设为竖直偏振方向），之后通过测量透射光出射方向的变化，即可推算双折射棱镜的偏转角度。而弱测量的方案则是在探测光入射到棱镜前先让其通过一片偏振片，使其偏振为竖直偏振和水平偏振的叠加，这样光束透过棱镜之后，竖直偏振和水平偏振的偏转角会略有不同，假设棱镜偏转角较小，则透射光会如图 1 所示分为三个部分：位于中间大部分区域的光束偏振仍然为竖直偏振和水平偏振的叠加，而位于上面部分的光束偏振为水平偏振，位于下面部分的光束偏振为竖直偏振。这时再利用第二片与第一片偏振片偏振方向接近正交的偏振片对透射光进行筛选，中间的大部分光束将被阻挡，剩下上、下两部分光束，而通过再次筛选，我们可以仅保留下面部分的光束。从图中最右侧的曲线可以看出，在弱测量的方案中，探测器所探测到的信号位移 γ 将比普通方案中的信号位移更大，也就是系统

的探测灵敏度被提高了。不过弱测量方案也带了一项缺陷，那就是由于第二片偏振片对探测光束的筛选在提升信号位移的同时，也大大衰减了待测信号。

正是由于弱测量在放大待测量的同时也衰减了信号强度、丢弃了大量数据，因此就弱测量技术在测量灵敏度等方面能否胜过传统测量技术的问题，学界一直存在一定争议。目前的主流结论是在接近理想的测量条件下，弱测量技术并不能保证探测性能的提升。但是在现实条件下，由于噪声的存在以及测量设备的不完美，例如探测器分辨率有限、探测器测量范围存在饱和上限，弱测量在很多实际情况下都可以体现出其优异性。

Application example	Weak value aspect	Distance scale	Advantages	Challenges	Maturity of technique
rover based sensors	amplification	short	decreased limitation in detector system. increased robustness to noise or system misalignment.	limited types of measurements	well understood
planet-to-satellite communication	amplification	medium	decreased limitation in detector system. increased robustness to noise or system misalignment.	limited types of measurements	well understood
detection of astronomical objects	amplification	long	decreased limitation in detector system. increased robustness to noise or system misalignment.	limited types of measurements	well understood
quantum foundations	simultaneous measurement	short & medium	enables new experiments	unknown	not well understood
gravitational science	amplification & simultaneous measurement	unknown	enables new sensors	unknown	not well understood
quantum receiver design	amplification & simultaneous measurement	short & medium	unknown	unknown	not well understood

图 2 弱测量技术在航天领域的潜在应用方向

弱测量技术虽然发源于量子力学的基础理论研究，但是由图 1 的实例已经可以看出弱测量原理同样可以应用于经典态，同样可以获得探测性能的提升。正因为弱测量技术无需依赖脆弱的量子态，其近期的应用前景被不少人看好，研究者希望尽快让弱测量技术在合适的应用场景中发挥作用。

早在 2012 年，一场历时半年由美国 Keck 空间研究所主办，由美国喷气推进实验室、加州理工、麻省理工等美国研究所及大学参与的《关于量子通信、量子传感和量子精密测量技术在空间领域的潜在应用》研讨会上，弱测量技术就是研讨会的八大议题之一。会上总结了弱测量技术在航天领域的几大潜在应用方向，如图 2 所示。总体上弱测量技术在航天领域的潜在应用分为两类：一是目前原理

上已经比较清楚，已经可以进行初步的应用验证，包括星地对准测量、天体观测等；二是目前原理上尚需进一步研究，在原理上进一步完善后才能推向应用，包括外层空间实验平台的量子基础理论验证、引力波研究等。钱学森空间技术实验室量子技术研究中心结合自身研究团队构成和研究基础，目前开展的弱测量技术研究瞄准的应用方向分为卫星测姿、双折射天体观测以及光学陀螺仪三个方面。



图 3 弱测量技术用于卫星姿态测量

3 弱测量技术应用

在卫星测姿方面，主要是利用弱测量技术进行偏转角测量。此前利用弱测量技术，美国 Rochester 大学 J. C. Howell 研究组在 Sagnac 干涉仪中测量反射镜的偏转角度，已经实现了 400 ± 200 frad 精度的偏转角测量，同时镜面平移的探测精度也达到了 14 ± 7 fm，与不采用弱测量技术相比，探测灵敏度提升了 100 倍。考虑如图 3 所示的卫星姿态测量应用中，卫星接收地面基站发射的参考激光后，通过测量自身接收镜与参考光的夹角和位移的变化，即可确定自身的实时姿态。而在这一测量过程中采用弱测量技术，一方面可以提升姿态测量灵敏度，另一方面还可以降低测量系统对探测器的分辨率和动态范围要求，即采用弱测量技术后，用廉价的低指标探测器即可达到原先高指标探测器的探测性能。

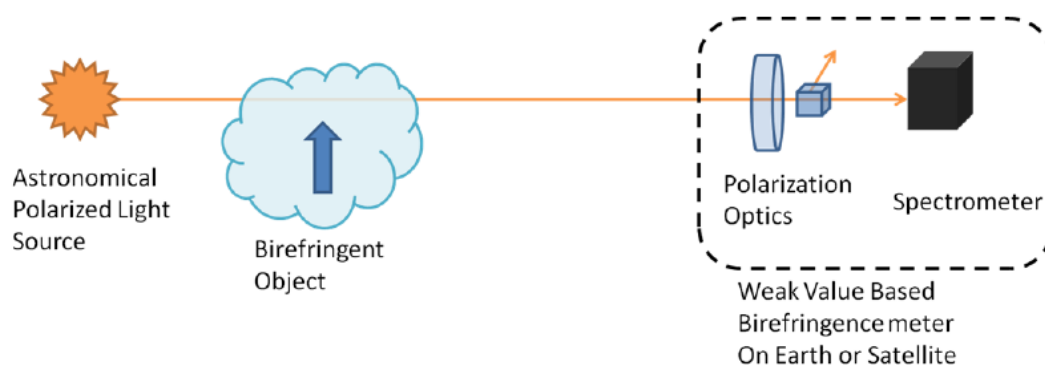


图 4 弱测量技术用于双折射天体观测

在天体观测方面，主要是通过对光束偏转和光束频谱的联合测量来推算天体

的双折射特性。此前 J. C. Howell 研究组通过测量干涉仪中的光束偏转，在已知的偏转棱镜的双折射特性基础上推算出光束的频谱特性，其探测灵敏度提升了 80 倍。而与此类似，通过测量光束偏转和光束频谱就可以反过来推算透射物体的双折射特性。实际的天体观测应用场景如图 4 所示，在很多情况下，远处天体的发光都具有明确的偏振特性，这时如果在远方光源与地球之间存在双折射特性天体，就会导致地球上接收到的光束发生偏转，利用弱测量技术测得光束偏转后，再加上对光束频谱的精确测量，就可以推算出双折射天体的具体折射特性，进而推测其组分等信息。

光学陀螺仪方面，主要是利用弱测量技术提升相位探测灵敏度，同时抑制陀螺仪的部分漂移噪声。最早的弱测量技术实验研究的精密测量对象集中在位移、偏转角等物理量上，而作为光学测量手段中最为精密的相位干涉仪测量，直到最近才从实验上成功实现了干涉仪相位的弱测量。考虑到光学陀螺仪的原理就是通过测量 Sagnac 光学干涉仪中双向传播的两束光波相位差的变化来推算出系统的旋转速度，利用同样的干涉仪相位的弱测量手段可以有效提高光学陀螺仪的探测灵敏度。同时由于陀螺仪的重要指标漂移率源于测量系统的各类噪声，弱测量技术噪声抑制的特点恰巧可以改善陀螺仪的漂移率。因此弱测量技术的加入有望催生新一代的低成本高性能的光学陀螺仪。

4 总结及展望

卫星测姿、天体观测和光学陀螺仪三方面的原理验证研究都是基于 Sagnac 光学干涉仪来实现，在此基础上通过部分改动即可满足不同的测量需求。因此目前实验室正在搭建的基于 Sagnac 光学干涉仪的弱测量系统是一套多功能的基础性实验系统，是未来探索弱测量技术在空间领域应用的基石，也是当前的工作重点所在。

作者简介

冷晗阳：男，1985 年生，南京大学凝聚态物理专业博士研究生，钱学森空间技术实验室助理研究员，目前研究方向为量子光学的精密测量应用技术。

通信地址：北京市海淀区友谊路 104 号，邮编：100094。电话：010-68111079；E-mail：lenghanyang@qxslab.cn