

# 阵列式大口径激光雷达 ——窥探近地空间环境的“千里眼”

赵若灿 尹 钦 刘振威 周 航 王兆峰 李江滔  
黄 川 刘映妤 薛向辉

(中国科学技术大学 230026)

当我们仰望星空,我们到底在仰望什么?吸引我们的除了肉眼可见的繁星点点和月亮圆缺,还有鲜有人知的接近“透明”的中高层大气。中高层大气是高度为十几千米到几百千米之间的区域,这里相较于我们人类生存的对流层大气,更为稀薄,更为纯净,虽然我们肉眼可见的云雾和雨雪,通常发生在对流层(底层大气),但中高层大气更容易受到太阳和地磁活动的影响,与人类的生存环境和航天活动等关系也极为密切,这一区域的大气密度相较于对流层,更容易产生剧烈变化,这会严重影响卫星的轨道预测。在仰望星空的“好奇者”群体当中,有一批空间物理学家,他们穷其一生,探寻着中高层大气这块“透明”区域。在他们的眼中,这里并不是“小透明”,这里发生着能量的转化、物质的变更、粒子的碰撞和电磁相互作用等各种各样精彩而又鲜为人知的故事。这一区域离地面较为遥远,通常只有探空气球、高空飞艇和火箭能够直接到达,成本高昂,这也导致对这一区域的观测较为匮乏。为了更方便地研究这个区域,科学家们在不断地建造更多先进的遥感工具,目的在于能够直接在地面建设仪器,在时间维度上持续地对这一区域发生的各种物理过程进行遥感,这一手段,被称作“地基遥感”。

20世纪60年代,激光技术被发明出来,并快速开启了它在各个领域的重要应用。随之而来的,是激光雷达的问世。通过利用激光与大气成分的相互作用,大气激光雷达逐渐发展成为了中高层大气地基遥感领域不可或缺的工具。由于不同高度大气的成分和特征的不同,发展出了针对不同高度进

行探测的多种类型的大气激光雷达。比如,气溶胶激光雷达可以探测30 km以下的大气中的尘埃云雾,瑞利激光雷达能够探测30~80 km大气的温度、密度和风,共振荧光激光雷达可以探测80~200 km的金属原子和离子密度。然而,200 km以上的高度,由于大气稀薄到接近“真空”的程度,没有了易于激发的钠、铁等原子,各种分子和原子的密度大大降低,距离也非常遥远,即使发射高能量的激光到这个区域,在地面上能够接收到的信号也极其微弱,导致激光雷达想要探测这一区域,在技术和原理上变得极为困难。尽管面临巨大的技术挑战,空间物理学家们,经过多年的技术论证和攻关,探索出了一种目前唯一可行的200~1000 km的大气激光雷达探测手段,那就是亚稳态氦激光雷达。

亚稳态氦激光雷达,顾名思义,就是利用200~1000 km大气中本来就存在的亚稳态氦原子作为“示踪物”,从地面发射高能量的激光,激光传输到这个高度以后,能够激发亚稳态氦原子的荧光,荧光是向各个方向均匀地发射出来(图1),其中只有一小部分沿着垂直方向严格向下传输的荧光,能够被地面的望远镜接收到。通过接收到的能量大小,就可以计算得到大气中亚稳态氦原子的密度,再通过理论模型,进一步推算出大气基态氦原子的密度。虽然这一探测原理与80~200 km的金属原子共振荧光激光雷达基本相同,但亚稳态氦激光雷达需要完成更为“艰巨的任务”,具体来讲,200 km以上的亚稳态氦原子密度即使在最强的时候,相较于200 km以下的金属原子(以最为典型的90 km高度钠原

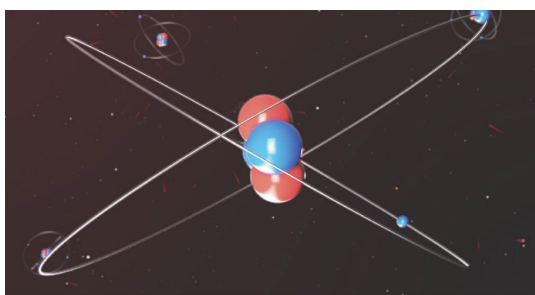


图1 中高层大气中的亚稳态氦原子,被激光雷达发出的激光激发出共振荧光,发出光子

子为例),密度也低了几千倍,另外,由于亚稳态氦原子密度的峰值大约在400~600 km,距离远了好几倍,而接收信号的强度与距离的平方成反比关系,这就导致在地面能接收到的信号,在同等条件下,只相当于传统的钠激光雷达信号的一万到一百万分之一。听起来,这似乎是一个“不可能完成的任务”。但是方法总比困难多,为了完成这个任务,中国科学技术大学的激光雷达团队,近十年来,不断地开展技术攻关和理论创新,通过多个关键技术的验证成功,让亚稳态氦激光雷达的实现成为了可能。首先,我们需要建设一台单脉冲能量能够达到400 mJ的1083 nm脉冲激光器,才能够有足够的能量用于激发大气中极其稀少的亚稳态氦原子,尽管400 mJ的能量听起来并不大,但我们需要将这么多能量集中在10 ns的时间内发射到大气中,如此一来,激光的峰值功率就高达40 MW,相当于100万台白炽灯同时点亮;其次,由于距离遥远,在地面能

够接收到的荧光信号极其微弱,我们需要足够大的望远镜(口径2 m以上)来尽可能多地接收信号,然而大口径的望远镜,价格非常昂贵,为了优化成本,我们采用了围成一圈的六个1 m口径的望远镜组合接收,这样就能够以大约五分之一的成本实现同样的效果,这也成为了“阵列式大口径激光雷达”这个名字的由来(图2);最后,由于接收到的荧光已经弱到了单光子级别,一个光子的能量极低,传统的红外光电探测器无法探测,这就需要一台能够灵敏到对单个光子进行探测的光电探测器,然而,目前市面上的红外单光子探测器,都具有很高的噪声,这个噪声的强度甚至高于从大气中接收的信号,幸运的是,通过前沿的交叉合作,我们研制出一款高性能的超导纳米线探测器,能够灵敏地探测到单个光子,并准确记录下光子到达的时间,与此同时,这个探测器能够保持极低的噪声。然而,引入这个新技术的同时,也引入了新的难题,由于超导纳米线内部的探测芯片对长波光光子极为敏感,如果用于传导单光子的光纤过粗,会将黑体辐射引入,使得探测器自发产生过多的噪声,干扰信号的探测,只能将光纤的芯径控制在200  $\mu\text{m}$ 左右,而这根光纤还要一分为六,接入六个望远镜,这就导致每个望远镜接入的光纤只有60  $\mu\text{m}$ 大小,大约是一根头发丝的直径,相较于传统的钠激光雷达通常所采用的1 mm光纤,光纤细了十几倍,这意味着望远镜

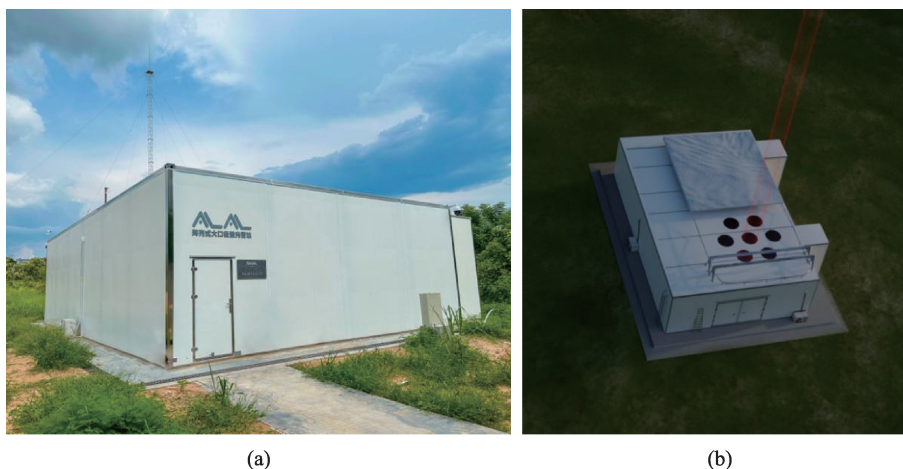


图2 (a)阵列式大口径激光雷达方舱照片;(b)方舱设计图,图中红色光柱表示1083 nm激光束,实际为不可见光,这里为了示意,表示为红色

的视场将缩小十几倍,在极小的视场下,还需要精准地控制发射光与接收光的方向,使得收发保持高度重合,如果把这个过程比喻成一个射击比赛,那么我们不仅需要用激光“瞄准”并击中千里之外的高空原子,还要再精准地将千里之外飞回来的光子精准地接住并弹进  $60\ \mu\text{m}$  大小的光纤端面,这个过程犹如刀尖上的舞蹈,失之毫厘,谬以千里。

由中国科学技术大学承担建设的这台“阵列式大口径激光雷达”,前期经过5年的技术原理验证与技术仿真,在2019年正式开始从无到有的建设。2023年,国际首台具有全季节观测能力的亚稳态氦激光雷达建设完成。这台雷达,占地  $150\ \text{m}^2$ ,主要由激光发射系统、阵列式望远镜接收系统和光电探测及控制系统组成。激光发射系统(图3)的功能是发射出  $1083\ \text{nm}$  的高能量脉冲激光,为了输出足够的能量,我们集成了三套相同的激光系统,再将三台激光的能量聚合到一起。与此同时,为了激发亚稳态氦原子的共振荧光,需要将激光的波长精确地锁定在  $1083.034\ \text{nm}$ ,控制精度需要达到  $1\ \text{pm}$ ,只有这样,发射出去的激光才能够准确地将亚稳态氦原子激发到更高的能级,从而产生荧光。由于激光能量非常高,很容易让灰尘碳化并污染激光器内的光学器件,所以整个激光器要放置在高洁净度的净化室内,与此同时,激光系统精密的光路,对震动极为敏感,激光器还要放置在经过良好隔振的平台上。这使得整个激光发射系统的占地面积达到了



图3 1083 nm 激光发射系统,由三套相同的激光系统组成,三个激光束聚合为一束激光

$50\ \text{m}^2$ 左右。阵列式望远镜接收系统,包含6个围成一圈的  $1\ \text{m}$  口径的接收望远镜和一个位于中心位置的  $1\ \text{m}$  口径发射镜(图4)。激光束经过扩束和整形以后,被中心的发射镜垂直发射进入大气中,6个望远镜垂直指向天空,用于接收从大气中返回的信号,并将信号聚焦到光纤中,光纤再将信号导入超导纳米线探测器中。光电探测及控制系统包括超导纳米线探测器、采集卡、电控系统和软件等,用于将接收回来的单光子信号转化为电信号并进行软件处理,同时,通过电控系统,对望远镜和发射镜的指向进行精密的控制(图5)。通过以上三个分系统的协同配合,阵列式大口径激光雷达实现了超高的探测灵敏度,能够在亚稳态氦密度低至  $0.001\ \text{cm}^{-3}$  的时候实现有效探测,这样低的密度,相当于  $1\ \text{m}^3$  的空间里面,只有 1000 个亚稳态氦原子,而我们生活

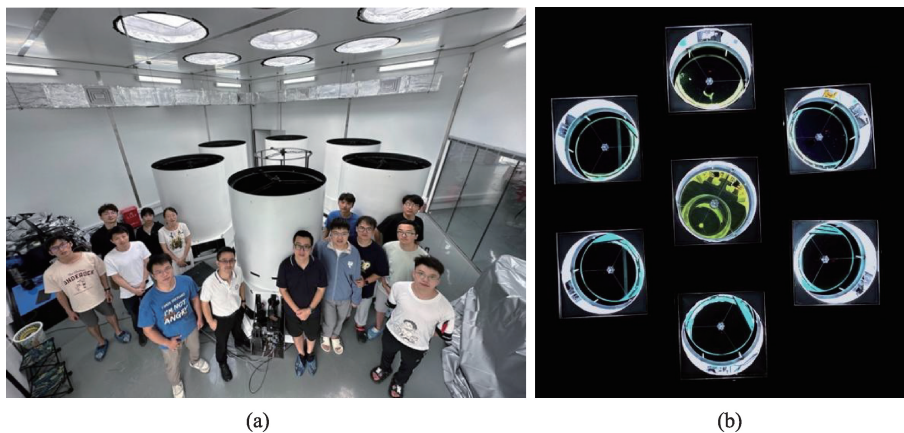


图4 (a) 阵列式望远镜接收系统及建设团队成员;(b) 夜晚俯视角度下的望远镜阵列



图5 光电探测和控制系统

的标准大气里,大约 $0.02\text{ m}^3$ 的空间,就有 $1\text{ mol}(6\times 10^{23})$ 大气分子。根据理论模拟,亚稳态氦在冬季和夏季的密度会产生大幅度的变化,冬季最高可以达到 $1\text{ cm}^{-3}$ ,但夏季会低100到1000倍,得益于阵列式大口径激光雷达的高性能和高灵敏度,我们最终在国际上首次实现了包含夏季的全季节观测能力。

每一个大科学装置的建设,都离不开参与其中的科技工作者们持之以恒的热爱与付出。阵列式大口径激光雷达的建设过程也不例外。在整个项目长达五年的建设期,建设团队中不仅有多名资深的激光雷达技术专家和空间物理科学家,还有很多“新兵蛋子”研究生和“初出茅庐”的博士后,他们在参与的过程中,通过平台的滋养与自身的坚持努力,逐渐成长成为在激光遥感领域的技术特长型人才,只有技术队伍强大起来,亚稳态氦激光雷达这样的大型科学仪器,才能被建设得越来越好,运行的质量也会越来越高。与此同时,阵列式大口径激光雷达融合了多项前沿技术,这离不开多学科交叉的优势。建设过程中,激光雷达团队与多所大学的

课题组、各大研究院所以及国内外高科技公司的研发部门等机构开展深度合作,产出了一大批高精尖技术成果,也获得多项国家发明专利。

时至今日,阵列式大口径激光雷达已经正式开展观测运行半年时间,这群“仰望星空”的人,注定会驻守在这 $150\text{ m}^2$ 的雷达方舱中(图6),静候一个又一个晴朗的夜空,用他们的知识和好奇心,驱动这台钢铁巨兽,以 $10\text{ ns}$ 的速度和 $50\text{ Hz}$ 的频率,将比万万亿还多得多的光子,投掷到千里之外的“太空”,再静候一个又一个荧光光子飞行千里后的到达,最后记录下每个光子到达的时间以及他们的数量。在这巨量而又复杂的数据海洋中,他们以创新思考 and 与生俱来的好奇心为动力,奋起远航,让空间物理科学这艘巨轮,在近地空间沉稳前行。他们相信在未来的某一天,当他们仰望星空的时候,可以骄傲地跟旁边的家人和孩子说,你看,现在飞过的中国空间站所在的那个远方,是我们“发明”的千里眼才能看到的地方,那里有最美丽的光电表演,原子、离子、电子、光子在为我们上演最奇妙的故事。



图6 雷达方舱内部照片(左侧为望远镜室,右侧为激光器室)