

文章编号 1674-2915(2010)05-0440-06

多光束傅里叶望远镜的关键技术

董磊, 王斌, 刘欣悦

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了实现对远距离暗弱快速运动目标的高分辨率成像, 基于多光束傅里叶望远镜的组成, 对光学分系统、机械分系统、电子分系统和软件分系统涉及的关键技术进行了分析和讨论。针对光学分系统主要分析了激光光源、相位延迟器、声光移频器和光电倍增管所涉及的主要技术指标; 机械分系统讨论了发射望远镜指示和跟踪精度、发射光束的快速切换和主镜的拼接支撑结构等; 电子分系统介绍了同步控制、电磁屏蔽和配电等需要注意的问题; 而针对软件分系统则讨论了光束快速切换、位置和角度变化的同步控制和图像恢复等。对上述关键技术的分析和讨论为多光束傅里叶望远镜系统的研制提供了参考。

关键词: 多光束傅里叶望远镜; 主动成像; 相位闭合

中图分类号: TH743 文献标识码: A

Introduction to key techniques of multiple beam Fourier telescope

DONG Lei, WANG Bin, LIU Xin-yue

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: To implement the high resolution imaging of a fast motion target in a longer distance, the key techniques of a multi-beam Fourier telescope are preliminarily analyzed in this paper. On the basis of the system composition, the key techniques in optical sub-system, mechanical sub-system, electrical sub-system and software sub-system are discussed separately. In optical subsystem, the key techniques are focused on the main specifications of laser sources, phase detection elements, acousto-optic frequency shifters and opto-electric tubes; and in mechanical sub-system, it is pointed out that the directing and tracking of the telescope, fast-switch of beams and supporting structure of primary mirror should be paid more attention. Furthermore, the electrical sub-system emphasizes the synchronization control, electromagnetic shielding and power distribution and the software subsystem lays the stress on the fast switch of beams, synchronization of changing of locations and angles and image restoration. The analysis and discuss in this paper will be provide a reference for the design of multi-beam Fourier telescope.

Key words: multiple beam Fourier telescope; active imaging; phase closure

1 引言

傅里叶望远镜优于传统望远镜的最大特点在于可以对不发光目标成像并克服大气扰动的影响^[1-3],其中对暗弱目标成像由激光主动照明技术实现;而同时发射3束激光通过相位闭合的方法可消除大气扰动的影响;另外,改变发射望远镜之间的基线长度可以提高成像分辨率。上述优点使得傅里叶望远镜成为对远距离暗弱目标高分辨率成像的理想系统,其理论和实验研究已有多篇文献报道^[4-7]。然而,传统的3光束傅里叶望远镜成像时间长的缺点使其仅能对静止目标成像。为了实现快速运动目标高分辨率成像,必须减少成像时间,于是多光束傅里叶望远镜技术应运而生。

多光束傅里叶望远镜每次发射光束的数目大于3束,可以同时获得大量的目标傅里叶分量^[8]。但是对低轨快速运动目标成像,需要将成像时间压缩到1s左右,做到这一点涉及许多关键技术,比如高功率长相干激光器的研制,光强均分和保偏技术,大移频带宽声光移频器的研制等,而且每项关键技术均包含若干更具体的技术和性能指标,因此,研究多光束傅里叶望远镜应用的关键技术对其最终实际系统的实现及其发展有非常重要的意义。目前,虽然对多光束傅里叶望远镜已经有一些原理和实验方面的报道^[8-10],但是对于最终成像系统的关键技术尚未见报道。本文基于多光束傅里叶望远镜的组成,详细讨论了其各个组成系统的关键技术。

2 多光束傅里叶望远镜的关键技术

多光束傅里叶望远镜整个系统由光学、机械、电子和软件等多个子系统共同组成,每个子系统均包含若干个关键技术。本文将分别论述光学分系统、机械分系统、电子分系统和软件分系统这4个系统的关键技术。

2.1 光学分系统的关键技术

光学系统主要分成发射系统和接收系统两大部分。多光束傅里叶望远镜的发射系统由激光光

源、分光系统、传递光纤、光相位延迟器、声光移频器、空间滤波器和发射望远镜组成。傅里叶望远镜的接收系统由大靶面的能量接收器、各级光能会聚系统、光谱滤波器、光电倍增管探测器组成。在上述的器件中,激光光源、光相位延迟器、声光移频器、光电倍增管探测器是较为重要的器件。下面将分别阐述4种器件所需要的关键指标。

由于多光束傅里叶望远镜采用的是多束光同时发射,并且发射的光束数目越多获得的目标空间频率分量越多,整体成像时间越短,所以对激光器的发射总功率要求较高。如果成像系统对1000 km处的直径约为1 m的目标成像,根据激光在大气中的传播和经过目标的散射的相关公式可以算出对每束激光功率的要求大约为100 W,采用20束发射光束则需要激光器的发射功率大约为2000 W。为了避免大气扰动对条纹质量的影响,在目标表面形成清晰而又稳定的干涉条纹,则需要激光相干长度至少为m量级。而kW级的激光器保证相干长度满足m量级的要求本身就是个较为严格的指标要求。发射激光波长要尽可能选择大气窗口波段以降低散射和吸收对激光功率的损耗。激光器出射光束直径和发散角的尺寸将会影响声光移频器的移频效率:过大的光束直径需要很大的声光移频晶体同时对射频驱动功率有很高的要求;过大的发散角会降低一级衍射光的转化效率,从而降低入射光能的利用率。所以,多光束傅里叶望远镜对激光光源的要求主要是更高的发射功率,较大的相干长度,适当的波长,较小的光束直径和发散角,这些指标构成了所需激光器的关键技术。

由于激光相干长度不可能太长,而每次发射基线长度的不同(发射望远镜之间的距离不同)会造成任意两束发射激光间的光程差不同,最大可能达到10 m级,所以需要对每次发射时每束发射激光的相位进行调整,以使每次发射时所有发射激光的相位保持一致。一般由于大气湍流引起的光相位的变化为几百个波长,这里可以按1000个波长计算,波长为1 μm ,大气折射率约为1,产生的光程差约为1 mm。千瓦级激光器的激光相干长度最好为1 m,所以任意两束激光总的光程差应该 $<1\text{m}$ 才能够保证在目标表面形成干涉条

纹。由大气湍流引起的光程差为 1 mm, 剩下的光程差由发射光学系统引起, 其数值最好能够小于 1 cm。从前面的分析结果得到, 由基线长度的不同引起的两束激光的光程差可能高达 10 m, 这将是发射系统引起光程差的主要部分, 需要通过光相位延迟器加以调整。光相位延迟器的相位延迟范围应该 > 10 m, 用以补偿基线长度不同引起的光程差和发射光学系统中元件产生的光程差。延迟器的调节精度应该 < 1 cm 以保证补偿后的两束激光在发射望远镜出瞳处的光程差 < 1 cm, 这样, 再加上大气湍流引起的光程差后, 总光程差 < 1 m。除此之外, 光相位延迟器的有效通光口径、激光损伤阈值、延迟相位保持稳定性对于其在多光束傅里叶望远镜系统中的使用也有较为重要的作用。有效通光孔径保证在入射激光截面内都能够产生均匀的相位延迟, 激光损伤阈值使其在百瓦级激光连续照射下在系统工作时间内性能稳定, 延迟相位的稳定性应该保证在系统工作时间内相位变化小于 1 cm。

为了保证任意两束光对应的目标空间频率成分能够被解调出来, 任意两束光的光频差均不相同。当发射光束的数目很大时, 需要的差频数值将变得很大。如果采用简单的单向完全归纳法, 令最小的差频值为 10 kHz, 计算得出 23 束激光的最大差频值应为 42 GHz, 这对于现有的声光移频器带宽来说是无法实现的。借助于 Golomb 法则, 最小差频数值仍然选择 10 kHz, 23 束激光对应的最大差频值为 3.72 MHz, 该数值相对于前者小了 4 个数量级, 对于目前商用声光移频器来说可以保证该带宽。但是目前商用声光移频器的有效通光孔径普遍较小, 这是因为有效通光孔径越大超声波传播时间越长, 一级衍射光的转换效率会降低, 同时会消耗更高的功率。然而 kW 级激光的光束有效截面一般较大, 约为 1 cm, 在如此大的截面内产生高效的一级光衍射对于声光移频器的制造来说也是一个新的挑战。同时声光驱动源的射频功率稳定性也是一个较为重要的问题, 因为射频功率的变化将导致一级衍射光功率的变化, 为了产生明显的干涉条纹, 每束光的功率差别应该小于 5%。而引起每束光功率变化的主要原因是激光器本身的激光输出稳定性, 光路中不同元件

对激光的吸收和散射, 以及声光移频器的一级光衍射效率等等, 所以声光移频器的一级光衍射效率波动最好在系统工作时间内能够低于 1%。当然声光移频器的一级光衍射效率、激光损伤阈值、工作光谱范围等指标也应该考虑在高功率激光情况下的特殊性。

由于对快速运动目标成像时, 目标距离远 (1 000 km 以内)、面积小 (10 m² 以内)、运动速度快、反射率低, 所以经过目标散射后的激光被地面接收系统接收的能量很低。以文献 [9] 为例, 在接收到的光子数达到 10^8 /s 时, 由于采样率高达 MHz, 所以单次采样的光子数只有几十个, 如此低的光能水平要求探测器必须是单光子探测器, 且需采用高增益的光电倍增管。要求光电倍增管的增益高, 能够探测到少数几个光子的入射; 暗电流噪声低, 以减少器件本身散粒噪声对获取信号的影响; 探测器靶面大, 能够降低对前面光能收集系统的设计指标要求; 探测器的响应带宽大, 能够很好响应 MHz 以上的信号。另外, 探测器的光谱特性曲线能够尽可能包含红外波段, 进而能够在发射激光波长获得较高的量子效率。

除了光学分系统主要元件的关键技术外, 发射望远镜阵列的优化布局和声光移频器的移频频率的最优选择也是比较重要的。最简单的发射望远镜阵列布局是方阵, 通过改变发射望远镜在方阵中的位置可获得不同的目标空间频率信息。该布局方式也是冗余度很大的方式, 其中有大量的空间频率的重复, 这增加了发射次数, 延长了总成像时间。目前常见的冗余度较小的阵列是 T 型和环型, 然而这些分布也不是非冗余的, 所以有必要研究冗余度更低的分布方式阵列, 以便减少成像时间, 实现对速运动目标的高分辨率成像。对于声光移频器的移频频率, 如果采用简单单向归纳的方法将无法接收频率信号, 而采用 Golomb 法则获得的结果可以在现有声光移频器上得到体现, 然而 Golomb 法则并不是最优的, 所以对最优移频带宽的研究对于降低总移频带宽和提高最低移频频率 (这对于高功率激光是非常重要的) 将是非常必要的。

2.2 机械分系统的关键技术

总体来说, 多光束傅里叶望远镜对机械结构

的要求并不高。因为每个发射光束的截面直径只有 10 cm, 所以只要求发射望远镜的有效孔径 > 100 mm 就可以了, 这样的望远镜在业余爱好者市场已经非常普及。这里主要谈到的关键技术是发射望远镜的指示和跟踪精度、发射光束的快速稳定切换和接收主镜的拼接支撑结构。

由于望远镜基于发射光束在目标表面形成不同周期和取向的干涉条纹为成像原理, 条纹的周期和方向变化以及条纹的弯曲程度对能否准确获得目标空间频率分量有影响, 所以需要通过计算机仿真来分析多大的条纹周期和方向变化以及条纹弯曲程度不会对空间频率的获取产生明显影响。根据分析得出的数据可以推导出对发射望远镜指示精度的要求。同时由于目标的运动速度较快, 所以在目标运动过程中应该保持条纹的周期、方向和形状的变化在允许的范围之内, 以便根据具体的目标运动速度通过计算机仿真得出需要的发射望远镜的跟踪精度。

为了减少总的成像时间, 需要在每次发射光束后获得大量不同的目标傅里叶分量, 这就要求每次发射时发射光束的位置均不相同, 而每次发射的时间均很短, 故需要在很短的时间内实现多束光的快速切换。光束的具体切换方式取决于选择的发射望远镜阵列的分布方式。文献[9]介绍了一种分布方式, 该方式采用 21 个口径约为 1 m 的望远镜组成 6 边形阵列, 每个望远镜包含 7 个发射光束的可能位置。发射光束的快速切换便是实现在每个望远镜内的 7 个待选位置中选择合适的位置同时发射 23 束激光。文献[9]中实现快速切换的装置被称为拨盘 (clicker), 由反射光学元件组成。在快速切换的过程中需要考虑光束的方向是否会改变, 切换精度是否能保证基线的长度变化在允许范围之内, 切换是否会有明显的震动, 是否会引起光束的长时间震动等等。

多光束傅里叶望远镜的接收光学系统属于能量系统, 接收主镜不需要太高的光学精度, 但是由于接收面积较大, 估计为 100 m^2 , 所以主镜应该采用多块子镜拼接或者多个望远镜拼接的方式组成。如果采用多块子镜拼接的方式, 每块子镜都需要二维调节机构以实现所有子镜的共焦, 这将是一个很庞大的系统, 对于支撑调节机械结构将

是一个挑战。如果采用多个望远镜拼接的方式, 为了实现接收能量的最大化, 需要考虑采用多大口径的望远镜和排列布局, 如此多望远镜的支撑结构将是一个需要研究的难题。

2.3 电子分系统的关键技术

多光束傅里叶望远镜整个系统主要采用的是现有商用产品集成在一起组成性能优越的高分辨率成像系统, 自身需要专门设计的电路系统不是很多, 但也有几点需要特别注意。

首先是同步问题。发射光学分系统中每个发射望远镜对应的光束快速切换装置彼此必须保持同步, 这样能减少等待时间, 从而降低总的成像时间。与此类似, 光相位延迟器与每束发射光束的同步同样是非常重要的。由于接收光学系统采用多块子镜拼接或者多个望远镜拼接, 最远的两个子镜或者望远镜之间的距离可以达到几 m, 对应接收光信号的时间差约为 10^{-8} s , 而光信号的最高调制频率对应的周期约为 10^{-7} s , 与光信号的时间差比较接近, 可能会因为时间差造成每个子镜或望远镜接收的光信号的调制波形的波峰或者波谷无法重合, 从而引起合成电信号的畸变而产生严重的噪声, 所以需要通过电子延迟技术使得每个子镜或者望远镜单元产生的电信号的波形同步, 以获得信噪比较高的合成信号, 从而提高最终重构图像的质量。

其次是电磁屏蔽。由于发射光学分系统中含有声光移频器, 该设备需要射频电信号驱动超声换能器产生超声波, 这可能会影响到其它设备的正常工作, 比如高功率激光器、光束快速切换装置等等, 所以, 应该做到声光驱动源的良好屏蔽和各设备的接地。接收光学分系统中的光电倍增管属于高压设备, 会对周围电子设备产生一定的辐射影响, 应该对其加以屏蔽。对于发射 20 束以上光束配置中使用的高速 A/D 转换卡, 采样率可能高达 100 MHz, 很容易受到外界电磁幅射的影响, 所以应该考虑合适的屏蔽措施加以保护。

最后需要注意的就是系统的配电。由于发射光学分系统和接收光学分系统中包含了不少大功率的用电设备, 每个设备对电压稳定性和电压波纹等指标的要求均不相同。对于大功率激光器, 为了产生稳定的激光功率输出, 应该采取单独配

电。另外,驱动发射望远镜位置移动以及俯仰和方位旋转的电机需要很大的电流,也应该单独配电。光学接收分系统中控制拼接子镜或望远镜俯仰和方位旋转的电机同样需要整体单独配电。高速 A/D 采集卡需要电压稳定波纹较小的电源供应来保证其采样精度,而其采用的是 PCI 板卡的封装方式插入电脑主板中,所以对电脑的供电有较高的要求。

2.4 软件分系统的关键技术

发射光学分系统中的软件主要实现光束快速切换的同步控制以及发射望远镜位置移动和俯仰方位旋转的同步控制。每次发射都需选择对望远镜中的哪束光进行发射,以保证该次发射的任意两束激光对应的空间频率没有冗余,同时也要保证和之前发射的任意两束激光对应的空间频率均不相同。这关系到需要的发射次数和总成像时间,发射冗余越低,成像时间越短。设计合理的程序控制光束快速切换装置,实现发射光束的快速准确选择将是系统研究中非常重要的一环。为了实现快速运动目标的准确指示和精密跟踪,需要对每次发射时的望远镜的位置和俯仰方位取向进行精确调整,在保证发射望远镜姿态调整和光束快速切换装置的光束选择同步的前提下,还要确保每次发射的所有光束都能同时精确对准目标,这在系统研究中同样是非常关键的。

参考文献:

- [1] HOLMES R B, MA S, BHOWMIK A, *et al.*. Aperture-synthesis techniques that use very-low-power illumination[J]. *SPIE*, 1995, 2566: 177-185.
- [2] HOLMES R B, MA S, BHOWMIK A, *et al.*. Analysis and simulation of a synthetic-aperture technique for imaging through a turbulent medium[J]. *JOSA A*, 1996, 13(2) : 351-364.
- [3] FORD S D, VOELZ D G, GEO V L. Light Imaging National Testbed(GLINT) past, present, and future[J]. *SPIE*, 1999, 3815: 2-10.
- [4] BELEN KII M S. Coherence degradation of a speckle field and turbulence effects on Fourier telescope imaging system[J]. *SPIE*, 2002, 4489: 48-59.
- [5] BELEN KII M S, HUGHES K, BRINKLEY T, *et al.*. Effect of turbulence on downlink and horizontal path on high-order coherence moments in Fourier telescope system[J]. *SPIE*, 2002, 4821: 62-73.
- [6] CUELLAR E L, STAPP J, COOPER J. Laboratory and field experimental demonstration of a fourier telescope imaging system[J]. *SPIE*, 2005, 5896: 58960D/1-58960D/15.
- [7] 董磊,刘欣悦,王建立.实验室环境内傅里叶望远镜技术的实现[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6) : 999-1002.
DONG L, LIU X Y, WANG J L. The realization of Fourier telescope technology in laboratory[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6) : 999-1002
- [8] SPIVEY B, STAPP J, SANDLER D. Phase closure and object reconstruction algorithm for Fourier telescope applied to fast-

接收光学分系统中的软件主要用于实现多光束的时间解调、快速相位闭合算法、目标傅里叶分量的恢复和最终的图像重构。由于多光束调制频率的不同并且是非均匀分布,时间解调不能采用 3 光束的简单解调方式而需要构想出一种新的非均匀时间解调方法。同时为了减少相位闭合所占的时间,需要研究更快的闭合算法。为了减少激光散斑噪声和探测器噪声的影响,提高目标傅里叶分量信息的信噪比并最终重构高质量图像,需要研究新的目标傅里叶分量恢复算法和更优的图像重构算法。

3 结束语

傅里叶望远镜以其主动成像、合成孔径、相位闭合等优势成为远距离暗弱目标成像技术中最具竞争力的一种。多光束傅里叶望远镜则突破了传统 3 光束傅里叶望远镜只能对静止目标成像的限制,可以对远距离快速运动目标实现高分辨率成像,但目前该项技术在光学机械、电子和软件方面均存在技术瓶颈。为了实现多光束傅里叶望远镜成像技术,本文基于多光束傅里叶望远镜的组成,对其在光学、机械、电子和软件等方面的关键技术分别进行了研究,本文的研究工作将对多光束傅里叶望远镜系统的顺利研制提供参考。

moving targets[J]. *SPIE*, 2006, 630702/1-630702/16.

[9] STAPP J, SPIVEY B, CHEN L. Simulation of a Fourier telescope imaging system for objects in low earth orbit[J]. *SPIE*, 2006, 6307: 630701/1-630701/11.

[10] CUELLAR E L, COOPER J, MATHIS J. Laboratory demonstration of a multiple beam Fourier telescope imaging system [J]. *SPIE*, 2008, 7094: 70940G/1-70940G/12.

作者简介: 董 磊(1982—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 助理研究员, 主要从事傅里叶光学和激光技术与应用方面的研究。E-mail: postgradu@yahoo.com.cn

《发光学报》

EI 收录中文核心期刊

《发光学报》是中国科学院长春光学精密机械与物理研究所与中国物理学会发光分会共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业研究方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊, 曾于1992年, 1996年, 2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年; 美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年; 日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文; 2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”和“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。

本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》为双月刊, A4开本, 144页, 国内外公开发行。国内定价: 40元, 全年240元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国物理学会发光分会

地 址: 长春市东南湖大路3888号 《发光学报》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431) 86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

http://www.fgxb.org