

# 傅里叶望远镜激光发射系统性能分析

罗秀娟 张羽 高存孝 任娟 曹蓓 刘辉 陈明徕

中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

**摘要** 傅里叶望远镜发射系统的性能直接影响图像的分辨率和质量。分析了激光器的参数和性能要求,提出了光纤激光器的设计要点,并指出激光相干长度应至少为光程残差的1.6倍;对激光器的功率和频率稳定性进行了仿真,从设计、算法和使用角度给出了保证激光器稳定性的一些方法;而且结合仿真和实验结果,从发射孔径布局、孔径数量、位置精度和光束瞄准误差等方面,分析了发射器性能对成像质量的影响。指出了基线冗余度、图像分辨率、目标频谱分布和图像质量等因素在布设发射阵列应综合考虑。基于二维抽样定理和统计分析结果,得出计算发射孔径数量的公式,计算了傅里叶望远镜对1000 km低轨道目标达到5 cm分辨率时所需的发射孔径数目。此外,还得出发射孔径位置误差应小于最小孔径间距的5%的结论。

**关键词** 光学器件;傅里叶望远镜;发射器;分析;激光;性能

**中图分类号** TH743; TN249

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.0314001

## Performance Analysis of Laser Transmitting System for Fourier Telescope

Luo Xiujuan Zhang Yu Gao Cunxiao Ren Juan Cao Bei Liu Hui Chen Minglai

*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences,*

*Xi'an, Shaanxi 710119, China*

**Abstract** The performance of Fourier telescope transmitting system directly affects the image resolution and quality. The parameters and performance requirements of laser are analyzed. The design outline of fiber laser is presented. Meanwhile, the point is put forward that the laser coherence length need to be at least 1.6 times of the residual optical path. The stability of laser power and frequency is simulated. To ensure the stability of the laser, some methods are put forward from the points of design, algorithm and practice. Furthermore, combined with the results of simulation and experiment, the influences of the transmitter performance on image quality is analyzed, from the aspects of transmitting aperture layout, aperture amount, position precision and the beam pointing error. And point out that baseline redundancy, image resolution, target spectrum and image quality are the factors should be synthetically considered when arranging transmitter array. The formula for calculating the number of transmitting apertures is obtained based on the two-dimensional sampling theorem and the statistical analysis results. The transmitting aperture number is calculated for the Fourier telescope whose resolution would be 5 cm for objects in 1000 km low earth orbit. In addition, it is concluded that the transmitting aperture position error should be less than 5% of the minimum aperture spacing.

**Key words** optical devices; Fourier telescope; transmitter; analysis; laser; performance

**OCIS codes** 140.3460; 110.6770; 110.1650; 220.1140; 350.5730

## 1 引言

傅里叶望远镜利用相干激光主动成像技术,无需付出复杂而昂贵的自适应光学代价,即可透过大气湍流对远距离空间目标进行高分辨率成像,已受到了国内外科研人员的广泛关注。除了大气湍流效应、路径

收稿日期: 2014-07-29; 收到修改稿日期: 2014-10-07

作者简介: 罗秀娟(1964—),女,研究员,主要从事高分辨率光学成像技术和光电跟踪测量方面的研究。

E-mail: xj\_luo@opt.ac.cn

匹配错误、信号散粒噪声、背景散粒噪声、探测器噪声、探测器动态范围、接收器时间选通、接收器阵列不同步等误差源外,还有与激光器及发射器相关的多种因素会影响傅里叶望远镜的成像质量,如:激光的功率和频率稳定性、偏振态一致性、发射器能量均衡性、发射孔径排布方式、孔径位置精度、光束瞄准精度等。

本文从激光源角度提出对激光器性能的要求,分析了激光器的工作波长和相干长度的选定原则,确定了适合傅里叶望远镜的激光器类型,并给出光纤激光器的设计思想。对激光器的性能进行了分析,探讨了保证激光源稳定性的一些方法和措施。对发射器的性能进行了理论分析和计算机仿真,得出有关发射孔径排布方式和位置精度的一些结论,给出计算发射孔径数量的公式;并结合室外实验结果,呈现了出射光束瞄准误差引起的图像亮暗不均现象,提出采取大气湍流波前矫正精密跟瞄技术手段来减小瞄准误差的理念。

## 2 激光器性能要求与设计

根据傅里叶望远镜的成像原理和应用背景,作为其信号光源的激光器应满足下列性能要求:单频、单模、保偏输出,光束质量好(激光发散角小、能量分布均匀、相干性好)、输出功率和输出稳定度高、高效、低噪声、体积小、重量轻、功耗低等。

### 2.1 工作波长

选择激光器工作波长主要考虑的因素有:产生该波长的高功率激光器的成熟度、对应的光电探测器的成熟度和可靠性、大气透射率、主要的探测目标对该波长激光的反射率、对应波段的背景光噪声、可靠性和电光转换效率。1064 nm波长的激光转换效率高、大气透射率和目标反射率高,而且背景光噪声较低,适合作为傅里叶望远镜的激光器波长。

### 2.2 相干长度

为实现对远距离目标的高分辨率成像,傅里叶望远镜的发射阵列规模通常较大,从激光器分束传输到各个发射孔径的最长光程较长。经过光相位延迟线(器)补偿光程差后,仍因光相位延迟器的调节精度、各光束对运动目标的响应时间差以及不同光学路径等因素,造成各光束间存在米级或更大的光程残差。如果激光相干长度太长,则会加重激光散斑场效应,影响有用信号的提取;而相干长度太短时,路径匹配效果又会变差,对上行链路激光的传输产生不利影响。此外,激光相干长度还要与目标的深度信息和接收器的规模相匹配,以获得最佳孔径平均。

傅里叶望远镜应同时保证干涉条纹的相干度和可见度。从相干长度的基本理论,可以推导出单模激光干涉条纹的可见度<sup>[1]</sup>为

$$V(\tau) = \exp\left[-\frac{(\pi\tau \cdot \delta\nu)^2}{4 \ln 2}\right], \quad (1)$$

式中  $\delta\nu$  为半功率点线宽,  $\tau$  为两波列的时间间隔,其相应的空间间隔为  $\Delta l = c\tau$ , 这里  $c$  为光速。一般认为干涉条纹的可见度  $V$  由峰值 ( $\Delta l = 0$  时) 下降到峰值的 0.707 倍时,干涉条纹仍可分辨,定义此时的  $\Delta l$  为光束的相干长度  $l_c$ 。由(1)式可得

$$l_c = 0.624 \frac{c}{\delta\nu} = 0.624 \frac{\lambda^2}{\delta\lambda}, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为激光波长。

因此,在实际应用中激光的相干长度至少为上述光程残差的 1/0.624, 约 1.6 倍。至于散斑效应,可以通过设置高采样率和充足的采集周期,增大接收器面积等手段降低其影响<sup>[2]</sup>。

### 2.3 激光器选型与设计

能发射 1064 nm 高相干度激光的激光器主要有三大类:半导体激光器、半导体抽运全固态激光器和半导体抽运光纤激光器。根据傅里叶望远镜对信号光源的要求以及三类激光器的主要技术特点,可选用全光纤型光纤激光器作为傅里叶望远镜系统的信号光源。设计时可采用主振荡放大(MOPA)阵列全光纤激光器技术,实现全光纤化和多路激光输出,保证激光器的可靠性和稳定性,其光路结构如图 1 所示。

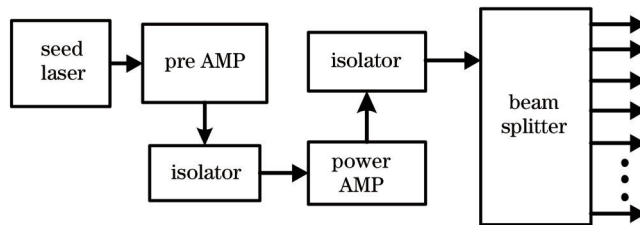


图 1 MOPA 阵列光纤激光器光学结构示意图

Fig.1 Optical structure of the MOPA array fiber laser

种子激光器采用单模光纤输出的线偏振分布式反馈(DFB)半导体激光器,内部集成半导体制冷器(TEC)和热传感器,通过温控电路对激光器进行高精度的温度控制,使激光器的输出波长稳定,在放大时可获得较为稳定的功率输出;预放大器为单模保偏光纤放大器,在其输出端使用光纤隔离器与下一级放大器隔离开,防止反馈光对前级系统造成干扰。主放大器可采用高增益的保偏双包层掺Yb<sup>3+</sup>光纤作为增益介质,在保证输出功率的前提下确保激光的单模输出。光纤分束器的输入输出光纤应与主放大器输出光纤匹配,控制每一路光纤的长度以保证每一路输出激光的光程一致。同时,采用自发辐射(ASE)的抑制技术,提高输出激光的信噪比。

### 3 激光器稳定性分析

傅里叶望远镜要求激光器能够在温变、振动、灰尘等外场环境中保持高稳定的输出。激光器的稳定性直接影响傅里叶望远镜的成像质量,主要包括激光器的功率稳定性、偏振态稳定性以及频率稳定性。

#### 3.1 激光器功率稳定性

除了大气引起的光强起伏外,激光器自身功率的不稳定也会影响目标上相干场的调制度,使目标的傅里叶频谱产生能量偏移。在信号采集的过程中,信号的调制强度不一致,使相位闭合的各个三重积采样接收到的反射光强发生改变,对傅里叶望远镜成像质量产生影响。

针对T型发射阵列三个单臂上的发射器数目均为10的情况,对外场实验中出现的类似现象进行模拟仿真。仿真中,保持三发射光束能量均衡(光束强度彼此相等),每个三重积仅采集80个点,采样时间设置为0.02 ms,远远小于大气相干时间1 ms,保证了在单个三重积采集的时间内,反射光的振幅保持不变。将各个三重积之间的振幅设置为0.75~1.25的随机变化数,变化步长为0.01,两个三重积之间光强最大差值为 $1.25^2/0.75^2 \approx 2.78$ 。分别利用简单目标1和复杂目标2进行仿真,结果如图2所示。图2(a)是原始目标图像,图2(b)为衍射极限下的理想重构图像,图2(c)~(f)为几组重构图像。与理想重构图像图2(b)相比,图2(c)~(f)成像对比度明显降低,图像噪声较大。

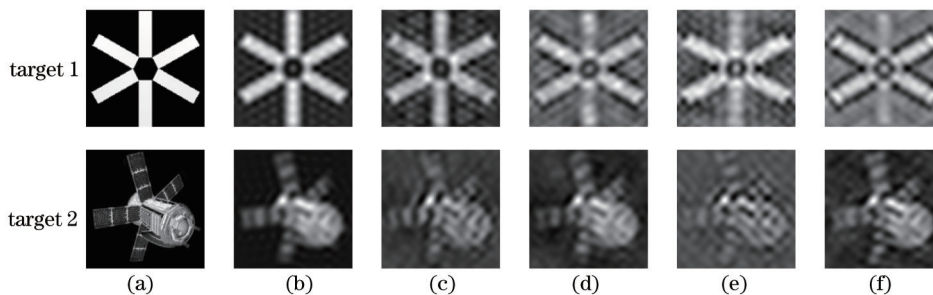


图 2 激光功率稳定性仿真。(a)原图;(b)衍射极限图;(c)~(f)光束振幅在0.75~1.25之间随机变化的重构图

Fig.2 Simulation of the stability of laser power. (a) Original image; (b) diffraction limit image; (c)~(f) reconstructed images with random beam amplitudes vary from 0.75 to 1.25

表征重构图像质量的斯特列尔比值如表1所示。目标1成像的平均斯特列尔比值从0.8227降为0.5994,目标2成像的平均斯特列尔比值从0.8530降为0.5310。可见,激光功率的不稳定对重构图像质量的影响不可忽视,应采取措施提高激光器输出功率的稳定性。

表 1 重构图像斯特列尔比值

Table 1 Strehl ratio of the reconstructed images

	b	c	d	e	f
Target 1	0.8227	0.7191	0.5670	0.6121	0.4996
Target 2	0.8530	0.5454	0.7060	0.4291	0.6788

除了设计高精度的激光器调制电路外,另一个重要环节是保证激光器的工作温度恒定,当实验环节中温度过高时,激光源输出功率会变得不稳。高功率激光器长时间工作会产生高温,高温会使激光器内部器件的工作状态发生变化、光纤薄层热致老化、元件损伤,严重时可能会出现炸裂,影响激光器的性能,降低器件的使用寿命。所以需要采用一定的散热措施,如:为光纤激光器加装金属散热器和风扇等散热装置。在夏季高温时节,则需考虑改善激光器的局部工作环境。

### 3.2 激光偏振特性

激光器各输出光束偏振度的稳定性和偏振态一致性直接影响干涉条纹的对比度,使接收的直流量提高、信噪比降低,进而影响干涉条纹在目标表面的反射信号和图像质量。偏振的稳定性包含两个方面,其一是单个出射激光束本身的线偏振度(DOP)稳定性,其二是各出射激光束之间偏振态(SOP)的一致性。可用Thorlabs等公司的偏振检测仪进行激光偏振特性的检测。

在傅里叶望远镜的外场实验中,一种简单的测试方法是利用偏振分光棱镜来测试某一激光束的线偏振度稳定性,方法如图3所示。在激光束出射处放置一个偏振分光棱镜(PBS),在棱镜后放置激光功率计的探头,此时进入功率计的光应该是一个方向震动的线偏振光。如果该光束的输出偏振度不稳定,那么经PBS滤出的光强度就会发生变化。

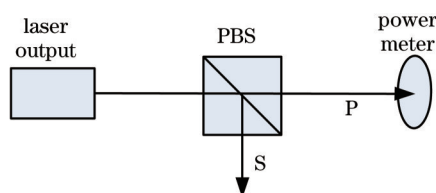


图 3 光束偏振稳定性测试示意图

Fig.3 Schematic of beam polarization stability

对于参与干涉的光束对,偏振态的一致性同样重要。根据杨氏双缝干涉原理可知,干涉条纹的对比度与光强、光源的空间相干性有关,当相干光束具有一致的偏振方向,各个光束之间可具有高对比度的干涉条纹。对光纤激光器,最简单的办法是通过旋转激光输出端的光纤准直器来调节偏振方向。调试方法为:在多路激光输出中,选择任意两个准直器,固定其中一个准直器,旋转另一个准直器的旋向,并从相机监控程序中观察干涉条纹的对比度变化情况,直至干涉条纹变清晰;按照此判定方法调整其他准直器,使各路激光输出的偏振光束具有一致的偏振方向,可获得较高的干涉条纹质量。图4对比展示了两光束偏振方向不一致[图4(a)]和一致[图4(b)]时的干涉条纹,可以看出,将准直器上的标记方向调节一致时,干涉条纹的对比度得到了明显增强。

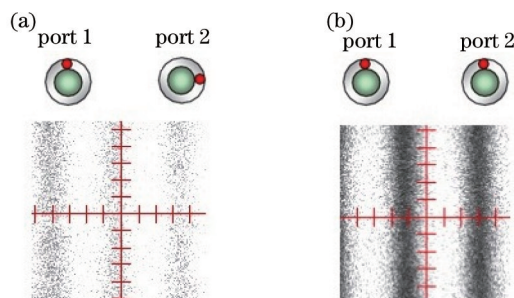


图 4 两光束偏振一致性对干涉条纹的影响。(a) 偏振方向不一致;(b)偏振方向一致

Fig.4 Effects of the two beams polarization consistency on fringe pattern. (a) With different polarization directions; (b) with the same polarization direction



### 3.3 激光频率稳定性

频率稳定度通常是指激光器在一定的观测时间  $t$  内频率的平均值  $\bar{\nu}$  与该时间内频率的变化量  $\Delta\nu$  之比, 即  $S(t) = \Delta\nu(t)/\bar{\nu}$ 。激光频率稳定性主要体现在激光纵模单一性上。傅里叶望远镜系统需要不同频移量的多束光进行干涉, 产生的干涉条纹用来对目标进行扫描, 不稳定的频移量会影响干涉条纹的效果, 降低采集信号的有效性。如果激光器的带宽有展宽或者存在多个频率, 那么干涉时便会产生一些多余的拍频量, 影响有用信号的正常解调, 使重构图像的质量受到影响。为了获得最佳的相干信号, 要求参与混频的信号光是理想相干性的单频单模光, 而且一般要求频率稳定度优于  $10^{-8}$ 。若激光器分束后的各路输出存在频率不一致问题, 可尝试用光纤补偿光程的方法消减这一现象。

除了对激光器的单频特性做出要求外, 还可改进图像重构算法, 减弱算法对频率的敏感度。例如, 基于全相位快速傅里叶变换谱分析的图像重构技术<sup>[3]</sup>, 不需要对信号频率做精确估计, 可避免频率误差带来的影响。图 5 为分别用传统算法和加入了全相位谱分析校正算法的仿真结果。



图 5 图像重构算法对激光频率误差的校正

Fig.5 Corrections of the image reconstruction algorithm for the frequency error

T 型发射阵列每臂上的孔径个数均为 20, 其他仿真参数与室外演示系统实验参数一致, 激光波长为 1064 nm, 成像距离 60 m, 目标尺寸为 4 mm×4 mm, 每次发射 3 束激光, 三个拍频分别为 50, 100, 150 kHz。仿真时在第一束光中加入了 5 kHz 的频率误差。可以看出, 与传统算法相比, 全相位谱图像重构算法有效地抑制了频率误差对成像质量的影响。

## 4 发射器性能要求与分析

### 4.1 发射孔径排布方式

傅里叶望远镜发射阵列的排布方式不同, 干涉条纹的频率与方向就不同, 进而形成不同形式的空间频谱。这些空间频谱对于不同的目标采样能力也不同。阵列的形状和冗余度等指标对整个系统的设计起着重要的作用。发射阵列形式一般有环形、Y 型和 T 型。其中环形阵可获得无冗余的空间频率采样, 但  $(u, v)$  采样点分布不均匀, 在相应的空间频率平面计算复杂; Y 型阵列虽然冗余度较小, 但在  $(u, v)$  平面的覆盖区域为特殊的六角星形, 其成像和校正算法的复杂度高; T 型阵列采样冗余度虽比 Y 型大, 但它在  $(u, v)$  平面上是规则的矩形栅格采样成像, 校正处理算法相对简单, 是研究傅里叶望远镜时常采用的一种发射阵列形式。

T 型发射阵列冗余度定义<sup>[4-6]</sup>如下:

$$R = \frac{C_N^2}{L}, \quad (3)$$

式中  $C$  为组合运算,  $N$  为发射孔径个数,  $L$  为两轴方向上孔径数的乘积。  $R=1$  时, 表明无冗余基线;  $R>1$  时, 存在冗余基线。可知, 冗余度随孔径分布方式  $L$  的不同而变化。

设 T 型发射阵列总孔径数为定值  $N$ , 阵列的横轴  $x$  与纵轴  $y$  的孔径数分别为  $N_x$  和  $N_y$ , 由 (3) 式得出基线的冗余度为

$$R = \frac{C_N^2}{N_x \cdot N_y} = \frac{C_N^2}{(N - N_x + 1) \cdot N_x} = \frac{N(N-1)}{2(N - N_x + 1) \cdot N_x}. \quad (4)$$

若  $N$  取值 60, 上式可写为:

$$R = \frac{30 \times 59}{(60 - N_x + 1) \cdot N_x}. \quad (5)$$

当横轴的孔径数从 1~59 变化时, 所构成的发射阵列基线冗余度曲线如图 6 所示。可以看出, 横轴孔径数目

为总孔径数的一半时,基线的冗余度最小。换言之,当横轴和纵轴发射孔径数相同时,所构成的T型阵列为最小冗余度阵列,获取的傅里叶分量最多。

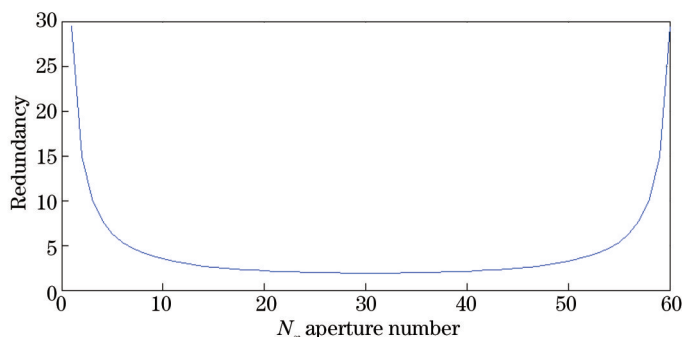


图6 基线冗余度随横轴孔径数目的变化曲线

Fig.6 Baseline redundancy varies with a transverse aperture amount

分别用两种不同发射孔径排布方式进行仿真。方式1为建成的600 mm等效孔径室外演示系统所采用的方式,两轴孔径数(除中心孔径外)的比例关系为7:10;方式2为冗余度最小的T型发射阵列孔径配置方式,两轴孔径数比例为1:1。重构的目标图像如图7所示。直观上看,两种方式的图像复原效果差异不太大,方式1两幅图像效果稍好些。

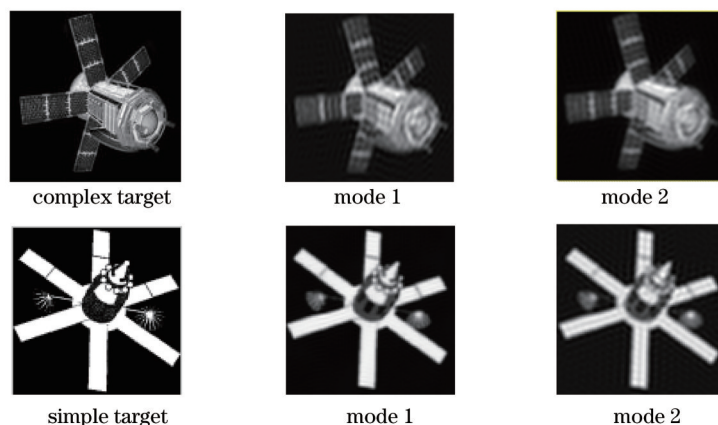


图7 两种基线配置方式下的重构目标图像

Fig.7 Reconstructed images of two different baseline configurations

表2列出了两种方式对应的基线冗余度、望远镜等效孔径和重构图像的斯特列尔比值。可以看出,在发射孔径总数相同的情况下,方式2与方式1相比,其基线冗余度小,但望远镜等效孔径和图像斯特列尔比值也小。也就是说,方式2的分辨率和图像质量比方式1的低。可见,最小冗余度的发射阵列孔径排布方式并不是最佳基线配置方式。

表2 不同基线配置方式的参数及图像斯特列尔比值

Table 2 Parameters and image Strehl ratio of different baseline configurations

Baseline configuration	Mode 1	Mode 2
Total transmitting apertures	69	69
Aperture number and ratio on the two axis (exclude the central aperture)	$N_y=28, N_x=40$ $N_y : N_x=7:10$	$N_y=34, N_x=34$ $N_y : N_x=1:1$
Equivalent Aperture ( $d$ is the spacing of adjacent apertures)	$40d$	$38d$
Baseline redundancy	1.97	1.915
Strehl ratio (complex target)	0.9120	0.8876
Strehl ratio (simple target)	0.9181	0.9004

图像质量还与发射阵列所能获取的目标频谱分布有关。如果发射阵列对应的基线频谱面分布能够恰当地反映目标的频谱分布,则重构图像质量较高。方式1和2两种发射孔径排布方式的U-V频谱分别为 $41 \times 57$ 和 $35 \times 69$ 的矩形均匀栅格点阵。显然,方式1比方式2的U-V频谱覆盖要短宽,基本能反映图7中两种目标的频谱分布;而方式2则适合对更细长的目标成像。因此,发射阵列的优化排布应综合考虑望远镜的等效孔径(分辨率)、基线冗余度、待探测目标的频谱分布共性以及图像质量等因素。

#### 4.2 发射孔径数量需求

傅里叶望远镜发射阵列设计的目标就是获得充分而均匀的U-V平面覆盖。由 $N$ 个发射孔径两两干涉会产生 $C_N^2$ 个回波信号,最细干涉条纹的周期为 $\lambda_z/D$ ,最粗条纹的周期就为 $\lambda_z/d \approx 2D_0$ ,其中, $\lambda$ 为激光波长, $z$ 为发射器到目标的距离, $d$ 为等间隔发射阵列中相邻发射孔径的间距, $D$ 为等效孔径, $D_0$ 为目标宽度。因此当干涉条纹的总数大约为 $(D/d)^2$ 时才能覆盖两轴方向上所有的中间空间频率<sup>[7]</sup>。在保证重构图像不失真,满足Whittaker-Shannon二维抽样定理的前提下,从T型发射阵列的优化排布方式及大量统计分析结果得出,发射阵列所需孔径数量 $N$ 的计算公式如下:

$$\frac{N(N-1)}{2} = 1.45 \left( \frac{D}{d} \right)^2. \quad (6)$$

若对1000 km远的低轨道目标(LEO)达到5 cm的成像分辨率,傅里叶望远镜的等效孔径应为30 m。在观测条件较好、波长 $\lambda=1064$  nm时,大气相干长度的值约为20 cm。为使每束光的强度在目标处均匀分布,单个发射孔径的直径应小于大气相干长度,一般为大气相干长度的1/2。典型的LEO卫星尺寸为 $D_0 \times D_0 = 2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ ,最大允许的发射器间距为 $d_{\max} = \lambda_z/D_0$ ,可设相邻孔径间距 $d=0.4$  m。由(6)式则可计算出 $N=128$ 。就是说,发射阵列需要布设128个发射孔径方能重建出较好的目标图像。为了保证较好的相干性,128束激光应为同源激光,所需激光总功率较高。可采用分组分时发射方案<sup>[8]</sup>,降低对激光器总功率的要求。在目标距离一定时,发射器孔径间距越小,视场就越大,可探测的目标尺寸就越大。因此,在满足结构与装调要求的前提下,若要增大视场或对更大目标成像,可适当地减小孔径间距 $d$ 值。相应地,所需的发射孔径数目也会增多。图像重建的分辨率因子<sup>[9]</sup>为

$$\delta \approx \frac{\lambda^2 z^2}{d^2 M}, \quad (7)$$

式中 $M$ 为不同傅里叶分量的数量, $M \sim N^2$ 。可知,在孔径间距 $d$ 一定的前提下,发射孔径数目 $N$ 越多,采样得到的傅里叶分量 $M$ 越多,从而对原始图像的逼近效果越好,得到的目标图像细节就越丰富。但是随着基线长度的增大,相距较远的两孔径干涉后的干涉条纹质量会下降,并且高频信号更易受到噪声的影响,处理不当也会降低图像质量。因此应同时考虑分辨率、图像质量、观测距离、目标自身的频谱成分、视场及成本等因素,合理设计发射器阵列规模和孔径数量。

#### 4.3 发射孔径位置精度

傅里叶望远镜产生干涉条纹的实质是使同源光束照射到同一位置时产生相位差,其干涉条纹间隔 $S = \lambda z/D_1$ ,其中, $\lambda$ 为波长, $z$ 为发射器到目标的距离, $D_1$ 为两个发射孔径间的距离。发射孔径位置误差会造成 $D_1$ 偏差,从而使干涉条纹间隔 $S$ 产生偏差。而干涉条纹的空间频率与条纹间隔成反比关系,因此 $S$ 偏差会影响远处干涉条纹的空间频率,最终影响空间频率对应的频谱和重构图像精度。

使用表2中方式1的基线排布方式进行频谱仿真分析(图8),最小孔径间距为15mm时,分别在 $y$ 轴上的第3、第10和第15个孔径上均加入20%的位置偏差。这些孔径与其他孔径光束所形成的干涉条纹间隔发生改变,特别是位置有误差的孔径与相邻孔径的干涉条纹宽度变化最大。从图8可以看出,所构成的U-V频谱面上的采样点变得不均匀,这样便会直接影响目标图像的重构。

针对T发射阵列三个单臂上的发射器数目均为10的情况进行位置误差仿真,最小孔径间距 $d=15$  mm,发射孔径同时存在随机轴向和径向误差时的仿真结果如图9所示。孔径位置误差最大变化范围分别为 $5\%d$ 、 $10\%d$ 、 $15\%d$ 和 $20\%d$ 。可以看出, $5\%d$ 孔径位置误差的成像效果是可以接受的。随着孔径位置误差的增大,造成的图像噪声增大,图像质量也随之下降,当位置误差最大变化范围为 $20\%d$ 时,已无法重构出目标图像。

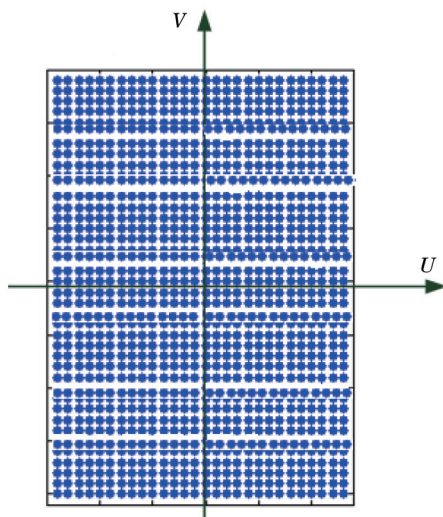


图 8 发射孔径位置误差对频谱面的影响

Fig.8 Effect of transmitter apertures on U-V spectrum of position error

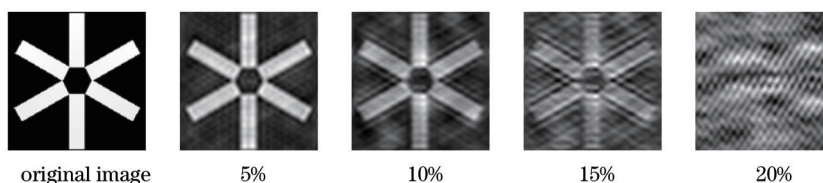


图 9 发射孔径位置有误差时的重构图像

Fig.9 Reconstructed images with position error of transmitter apertures

下面做进一步的仿真验证。将单臂发射器数目增加为 20 个,  $d=15\text{ mm}$ , 给 T 阵列各孔径加入最大  $5\%d$  的随机轴向和径向位置误差, 进行大量的仿真, 部分仿真结果如图 10 所示。从图像的斯特列尔比值可以看出,  $5\%d$  的定位误差对成像质量带来的影响较小, 可以满足成像要求。



图 10 轴向和径向位置误差为  $5\%d$  时的重构图像及斯特列尔比

Fig.10 Reconstructed images and Strehl ratio with  $5\%d$  position errors in both transverse directions

对 T 型发射阵列孔径位置误差的大量仿真结果还表明: 发射孔径的轴向位置误差比径向位置误差对图像重构结果的影响大。因此, 为各孔径只加入轴向随机位置误差, 利用 4.2 节中的 1000 km LEO 傅里叶望远镜的参数进行仿真, 结果如图 11 所示。可以直观地看出,  $10\%d$  孔径位置误差的图像对比度开始变差。在装调傅里叶望远镜系统时, 应综合分配各种影响因素的误差, 最好将发射孔径的位置误差控制在最小孔径间距的  $5\%$  以内。

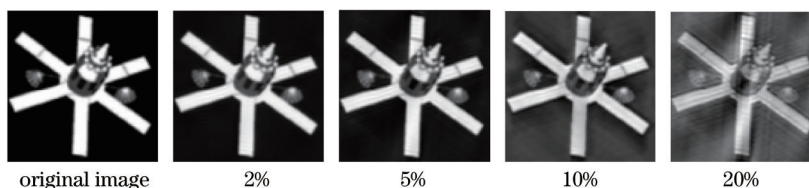


图 11 发射孔径只有轴向位置误差时的重构图像

Fig.11 Reconstructed images with position errors only in axes direction

#### 4.4 发射光束瞄准误差

照射到目标上的光功率与光束发散角的平方成反比关系。一方面, 为降低对激光器能量的需求, 傅里



叶望远镜激光光束需以较大的束腰直径和较小的发散角进行传输,这就对激光的瞄准精度提出了较高的要求。另一方面,激光在大气中的传输效应一定程度上影响了激光信号的探测。由大气折射率所致的光路弯曲、光束漂移和光斑扩展等都会影响激光的瞄准精度。根据激光光束在远场的传播特性可知,远场光斑横向振幅具有高斯分布的特性。到达目标处的激光束光斑中心能量最高。光斑越偏离中心位置,高斯光束能量峰值就越偏离中心位置。在目标距离和发射孔径间距一定的情况下,如果光束对目标的瞄准精度有偏差,使目标处的光照分布不均匀,会影响照射到目标的光束能量和干涉条纹的空间频率,两光束的重合度也会影响干涉条纹的对比度,进而影响到目标的探测与图像重建。图12为光斑中心偏离目标时的室外实验7×7重构图像,出现了图像亮暗不均问题,严重时甚至得不到目标图像。

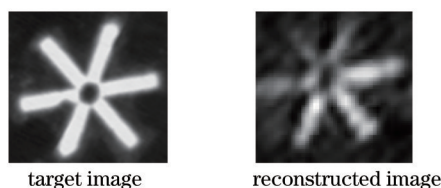


图12 存在瞄准误差时的实验结果

Fig.12 Experimental result with pointing error

用室外实验系统(图13)进行了大量实验,结果表明:瞄准误差对成像质量的影响很大。在系统设计时,可根据设计的傅里叶望远镜探测能力(探测距离、目标大小)及有效干涉面积计算出光束瞄准精度,采取大气湍流波前矫正精密跟踪与瞄准等技术手段<sup>[8]</sup>,将瞄准误差控制在瞄准精度范围内。

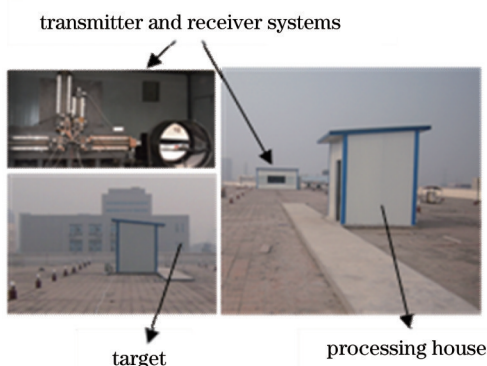


图13 室外实验装置与场地布局

Fig.13 Field experimental setup and layout outside

#### 4.5 发射器能量的均衡性

发射器能量不均衡是影响成像质量的一个重要因素。发射阵列中各孔径出射的光束能量不一致会造成干涉条纹的相干性变差,进而影响图像质量。因此,要求各出射光束间光强差别控制在5%的范围内<sup>[2]</sup>。在设计发射系统时,为确保发射阵列中各发射光束强度相同,应在光路中加入衰减器等光强调节装置,以便在需要时能有效地补偿光强。已在文献[2]中对该问题进行了详细分析与讨论,在此不再赘述。

## 5 结 论

激光发射系统是傅里叶望远镜的关键组成部分,直接影响整个系统的成像能力。傅里叶望远镜激光器应满足单频、单模、保偏、光束质量好、输出功率和稳定度高、高效、低噪声、体积小、重量轻、功耗低等性能要求。工作波长可选择背景光噪声较低且激光转换效率、大气透射率和目标反射率均较高的1064 nm。激光相干长度至少为经过光程差补偿后的光程残差的1.6倍;可选用单模半导体激光器作为种子的全光纤MOPA多路输出激光器作为傅里叶望远镜系统的信号光源,并采取高精度的激光器调制电路、加装散热装置、改善激光器局部工作环境等措施,保证激光功率的稳定性;用全相位谱分析及频谱校正等图像重建算法,降低对激光频率稳定性的敏感度;实验时,采取必要的手段监测和调节激光器各输出光束偏振度的稳定性和偏振

态一致性,降低其对干涉条纹对比度的影响,提高信噪比。发射阵列的排布应综合考虑分辨率、基线冗余度、待探测目标自身的频谱分布以及图像质量等因素,可用给出的计算发射孔径数量的公式,计算满足T型发射阵列的优化排布和二维抽样定理所需的发射孔径数目。发射孔径位置误差应小于最小孔径间距的5%。在满足结构设计和装调要求的前提下,可通过降低相邻孔径间距来增大视场。发射光束的瞄准精度对成像质量的影响很大,可采取大气湍流波前矫正精密跟踪与瞄准技术减小瞄准误差。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Jimin. Coherent length of ordinary lasers [J]. Laser Journal, 1991, 12(6): 311-313.  
杨齐民. 常见激光器的相干长度[J]. 激光杂志, 1991, 12(6): 311-313.
- 2 Luo Xiujuan, Zhang Yu, Sun Xin, *et al.*. Energy design of Fourier telescope system in the atmospheric environment [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0801004.  
罗秀娟, 张羽, 孙鑫, 等. 大气环境中傅里叶望远镜系统能量设计[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0801004.
- 3 Chen Wei, Li Quan, Wang Yangui. Object reconstruction of Fourier-telescope based on all-phase spectrum analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3441-3446.  
陈卫, 黎全, 王雁桂. 基于全相位谱分析的傅里叶望远镜目标重构[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3441-3446.
- 4 A T Moffet. Minimum-redundancy linear arrays [C]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1968, 16(2): 172-175.
- 5 Y L Chow. Comparison of some correlation array configurations for radio astronomy [C]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1970, 18: 567-569.
- 6 Dong Jian, Li Qingxia, Guo Wei, *et al.*. An approach to topology design of 2D sparse arrays for synthetic aperture interferometric radiometer [J]. Journal of Microwaves, 2009, 25(2): 83-86.  
董健, 李青侠, 郭伟, 等. 综合孔径辐射计二维稀疏天线阵列排列方法[J]. 微波学报, 2009, 25(2): 83-86.
- 7 R B Holmes, S Ma, A Bhowmik, *et al.*. Analysis and simulation of a synthetic-aperture technique for imaging through a turbulent medium [J]. J Opt Soc Am A, 1996, 13(2): 351-364.
- 8 Luo Xiujuan, Ma Caiwen, Zhang Yu, *et al.*. Design proposal of Fourier telescope transmitter for moving objects in low earth orbit [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2011, 28(4): 325-329.  
罗秀娟, 马彩文, 张羽, 等. 低轨道运动目标傅里叶望远镜发射器设计[J]. 深圳大学学报理工版, 2011, 28(4): 325-329.
- 9 P A Bakut. Theoretical Studies of Fourier Telescope for Deep Space Imaging [R]. International Informatization Academy Moscow (Russia) Laser and Information Technologies Department, 1999, A827863: 1-44.

栏目编辑: 韩峰