

多光束傅里叶望远镜成像质量主要因素分析

于树海^{1,2}, 王建立¹, 董磊¹, 刘欣悦¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:傅里叶望远镜在对深空暗弱目标成像方面有着独特的优势,但传统的3光束方阵成像扫描时间过长,只能对静止目标成像。为了在几秒之内对运动目标进行高分辨率成像,已经出现了几种不同类型的多光束发射阵列配置方案。在均匀分布排列中,T形配置是目前冗余度最小的结构之一。本文以6光束T形发射配置为例,简单介绍了傅里叶望远镜成像原理,依据T形发射阵列平面与空间频率平面的对应关系,分析了空间频率对成像质量的影响,验证T形发射阵列傅里叶望远镜成像优势,并进行了计算机仿真。得到了不同信噪比条件下的重构图像,通过在相同信噪比条件下和方阵阵列重构图像对比,成像质量完全满足要求且缩短了成像时间。仿真结果对室内和室外实验有着一定的指导作用,同时也为更多光束及其他发射阵列配置提供了参考。

关键词:多光束傅里叶望远镜;高分辨率成像;空间频率;图像重构;计算机仿真

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.12.011

Introduction of dominating factors of multiple beam FT imaging quality

YU Shu-hai^{1,2}, WANG Jian-li¹, DONG Lei¹, LIU Xin-yue¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Fourier Telescope (FT) is an active imaging technique that has a unique advantage for high resolution of deep space object which is very small and dim. The traditional three square beam imaging's scan time is too long and it is suitable only for stationary targets. To carry out high resolution imaging for moving targets within a few seconds, there have been several different types of multi-beam emission array configuration. T-type configuration is one with the least redundant structures. This paper uses T-type and 6 beam launching configuration to introduce the principle of Fourier imaging telescope. The relationship between T-emission array plane and the spatial frequency plane is derived. By analyzing the impact of spatial frequency on image quality, the advantages of T-type Fourier imaging telescope array are verified. Through computer simulation, the reconstructed images under different conditions are obtained. Image quality can meet the requirements and imaging time is shorter at the same SNR. It provides a guide line for the indoor and outdoor experiments and also provides a reference for more beam and other emission array configuration.

Key words: multiple beam fourier telescope; high resolution; spatial frequency; imaging reconstruction; computer demonstration

1 引言

在暗弱深空目标细节成像探测应用方面,由于受到大气湍流的影响,被动成像技术受到信噪比的

作者简介:于树海(1985-),男,硕士研究生,主要从事傅里叶望远镜关键技术及计算机仿真方面的研究。E-mail: yushuhai_0707@sina.com

收稿日期:2011-05-10

限制,成像质量很难满足要求,而应用自适应光学对大气湍流进行自适应校正,系统成本过高。傅里叶望远镜采用多激光照明,单一孔径接收的方式,综合了主动照明成像和合成孔径等技术优势,由于采用多激光对目标进行照明,降低了对激光器功率的要求,同时接收装置采用相对便宜的定日镜。在同等成像质量情况下,整体系统价钱远低于自适应光学技术^[1]。因此对于深空暗弱目标成像,傅里叶成像技术拥有独特的优势。

通过基于美国地球同步卫星主动成像实验平台(GLINT)相应傅里叶成像技术的研究^[2]以及国内相应文献报道^[3],傅里叶 3 光束方阵扫描技术已基本成熟。但为了获得足够多的目标的傅里叶分量信息,要求每次发射时发射光束的位置均不相同,而每次发射的时间都很短,故需要在很短的时间内实现光束切换。常规的 3 光束方阵发射望远镜扫描方式需要 1.4 h 左右,不能满足对运动目标成像的要求。因此提出同时发射多光束,在获得足够的傅里叶分量的前提下减少整体扫描时间。T 形发射阵列相对于常规的方阵扫描方式,大大降低了切换的次数,相对而言缩短了成像的时间。

本文将基于 3 光束傅里叶方阵成像原理对影响 6 光束 T 形发射阵列配置傅里叶成像系统质量的主要因素进行详细分析并给出计算机仿真重构图像,同时分析了发射阵列平面和空间频率平面的对应关系,以及发射器具体配置对成像质量的影响,最终得到了较好的傅里叶重构图像。

2 傅里叶望远镜成像原理

傅里叶望远镜是一项综合激光主动成像、光学合成孔径的高分辨率成像探测技术。基本工作原理为:发射器同时发射 3 束或者多束激光照射目标,在目标表面形成干涉条纹;通过在光束之间引入频移,使干涉条纹产生移动并扫描目标表面,从而对目标散射的回波信号进行时间调制。根据标量衍射理论,散射回波中包含了目标傅里叶分量信息,傅里叶分量由发射器的间距和方向确定;可以利用大面积非共相接收器接收经时间调制的散斑回波能量,然后通过解调得到相应的目标傅里叶分量。配置不同的发射器间距和方向可以得到不同的傅里叶分量,测量足够多的傅里叶分量之后,利用相位闭合和波前重构技术消除主要的随机相位误差,并经过傅里叶逆变换就可以得到目标的重构图像^[4]。傅里叶

望远镜系统的工作原理如图 1 所示。

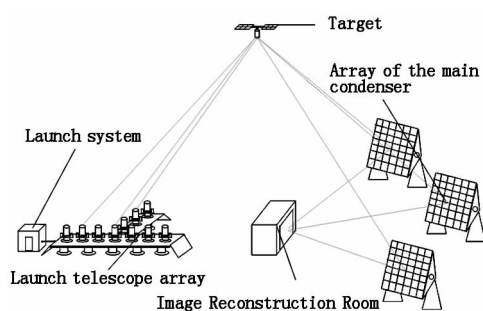


图 1 傅里叶成像技术概念图

Fig. 1 conceptual diagram of a Fourier telescope

3 多光束均匀阵列几何布局

传统的 3 光束方阵扫描方式几何布局采用相对拍频最小且不变的两个发射器位置保持固定不动,第 3 个发射器在平面上进行运动扫描,如图 2 所示。0,1 点发射器保持固定不变, f 点光束发射器在发射阵列平面进行运动扫描。

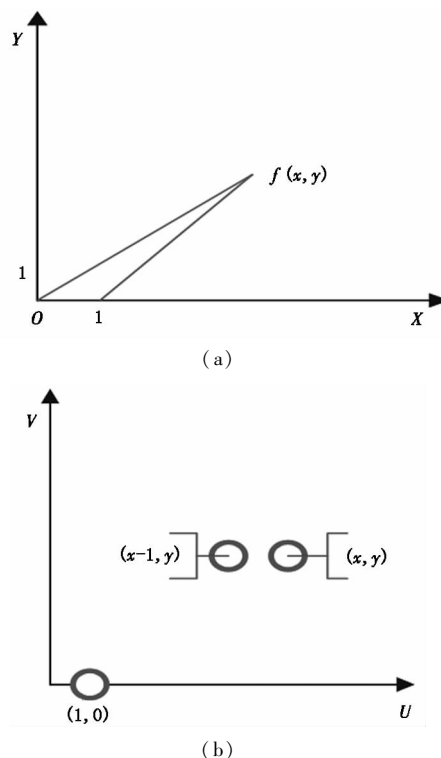


图 2 (a) 3 光束方阵发射望远镜平面

(b) 对应的空间频率平面

Fig. 2 (a) 3 square beam launch telescope plane

(b) the corresponding spatial frequency plane

其他均匀阵列发射器配置主要有 Y 形和环型及 T 形三种发射配置方式。环型冗余度最小,但在相应的空间频率平面计算较为复杂。Y 形阵列虽然所需要的望远镜数量较少,但在实际系统中带来的复杂性要多于其优点。因此我们选择冗余度相对较

小,实际操作较为简单的 T 形发射阵列配置。方阵阵列和 T 形阵列最大的区别在于,T 形阵列的激光发射器始终位于坐标轴上。3 光束 T 形发射器配置如图 3 所示。

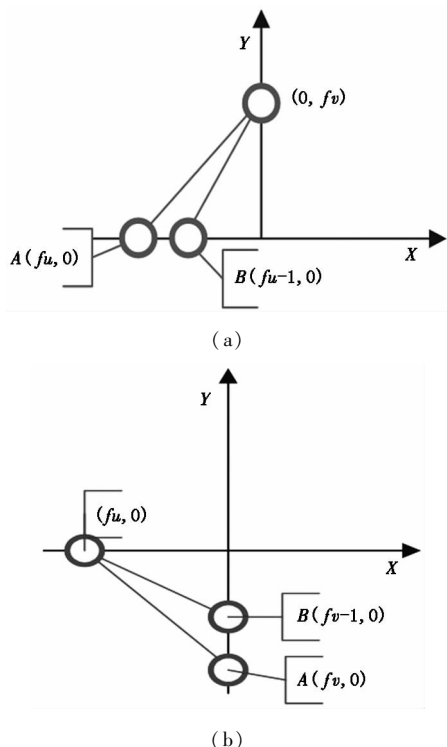


图 3 T 形阵列扫描象限

Fig. 3 T-type array scan quadrant

4 主要影响因素分析

计算机仿真过程中严格遵循实际应用原则,分析了各种因素对成像质量的影响,在仿真过程中加入了大气湍流、目标漫反射造成的激光散斑、空间频率选择及探测器噪声的影响。

4.1 大气湍流近似

光束在上行链路中受到大气湍流的影响,大气湍流利用大气相位屏近似。大气相位屏的厚度可以表示为:

$$\text{OPD}(x) = \text{Re} \{ \text{FT}[\sqrt{S_k(k)}] \sqrt{-\ln r_1(k)} \cdot \exp(i2\pi r_2(k)) \} \quad (1)$$

式中, $r_1(k)$ 和 $r_2(k)$ 为均匀分布的随机函数;FT表示傅里叶变化; $S_k(k)$ 表示大气湍流的功率谱函数:

$$S_k(k) = 0.38 \lambda^{-2} C_n^2 (k^2 + k_{\text{outerscale}}^2)^{-11/6} \cdot \exp(-k^2/k_{\text{innerscale}}^2) \quad (2)$$

式中, C_n^2 为大气折射率结构常数; k 是空间波数; $k_{\text{innerscale}} < k < k_{\text{outerscale}}$,其中 $k_{\text{innerscale}} = 1/L_0$, L_0 表示湍流的外尺度,一般为目标的高度。 $k_{\text{outerscale}} = 5.92/l_0$, l_0 为湍流的内尺度,通常为1~10 m。

4.2 高空间频率对成像质量的影响

应用多光束(光束大于3束)方阵成像时,选择两个点在发射阵列平面保持不动,其他光束发射器在平面上进行运动扫描的成像扫描方式有以下几点需要着重分析对待:

(1)运动扫描的4束光中任意两束光之间就存在在一个干涉条纹,对于成像系统而言,这些干涉条纹即成为噪声,如图4所示的F,G,M,H4束光任意形成的干涉条纹。增加了重构过程中的噪声。在同等信噪比的前提下,成像质量大大降低。

(2)但为了提高成像的速度,必然要同时解调多组三重积,若每组三重积都对应较高的空间频率,同样降低了成像的信噪比,成像质量受到严重影响。选择合适的间隔空间频率可以降低此噪声的影响。如在6光束情况下,用常规的方法扫描会同时得到基线长度为13,14,15,16的四组值,在较高的空间频率下对应较高的噪声。降低了信噪比。如果应用改进的发射器配置,得到的是基线长度为16,12,8,4的四组值,噪声水平会大大降低,提高了成像质量。

(3)在两束光发射望远镜位置保持不动的情况下,其他四束光在发射平面采用等间隔配置,尽可能增加相邻光束之间的相对距离,此方法可以提高成像质量。这是由于傅里叶望远镜主要收大气链路的上行链路影响,发射光束数量的增多导致目标反射信号中傅里叶解调空间频率分量信息增加,同时容易造成空间频率间隔减小,易导致相位抖动。增加发射望远镜之间的距离同时也是提高信噪比的有效方法。

4.3 探测器量子效率及激光散斑对成像质量影响分析

(1)探测器的信噪比表达式为式(3)所示,其中 N_{phot} 为光子数; η_{QE} 为探测器的量子效率; e_{back}^- 为暗电流; τ 为有效解调时间; e_{det}^- 为在 τ 时间内探测器产生的暗电流。

$$\text{SNR}_R = \frac{N_{\text{phot}} \eta_{QE} \tau}{\sqrt{(N_{\text{phot}} \eta_{QE} \tau + e_{\text{back}}^- + e_{\text{det}}^-)}} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,在实际系统操作过程中,提高信噪比最佳方式是提高探测器的量子效率。

同时探测器的平均探测信号可以表示为:

$$E_{\text{signal}}(t) = N_{\text{photon}}(t) * QE \quad (4)$$

式中, $N_{\text{photon}}(t)$ 为探测器接收的平均光子数; QE 为

探测器量子效率。由于接收光子数近似服从 Poisson 分布,则模拟的探测信号可以从均值 $E_{\text{signal}}(t)$ 的 Poisson 分布采样。此外探测器内部电路增益的随机波动也会引入额外的探测噪声,假设电路增益近似服从对数正态分布,则探测信号可以表示为:

$$\text{Signal}(t) = \text{Poisson}[E_{\text{signal}}(t)] * \text{LogNormal}[1, (\delta_c / \langle G \rangle)^2] \quad (5)$$

式中, $\langle G \rangle$ 为增益均值; δ_c 为增益均方根。

(2) 为分析不同光束下高空间频率下的信噪比, SNR_R 可用 $\sqrt{N_{\text{beam}}}$ 来代替^[6]。 N_{beam} 为发射光的光束数,得到在不同光束数量下高空间频率信噪比公式(6)。

$$\text{SNR}_f = \frac{\alpha \text{SNR}_R}{2} \quad (6)$$

式中, α 为多光束干涉条纹调制深度,其中 $\alpha = \frac{2}{N_{\text{beam}}}$,由此可以得出,在同等条件下。6 光束信噪比为 3 光束信噪比的 0.7 倍。

(3) 激光在目标表面反射通常为漫反射,必然会造成激光散斑,选择适当大小的非共相接收器,使其远大于扰动所引起闪烁或激光散斑的尺寸,大面积接收器可以平均掉闪烁或激光散斑干扰。通过实验室完成的 3 光束点面阵列外场试验有力的证明此点。

5 仿真结果

仿真平台为 MATLAB,仿真目标距离为 40000 km,大小为 20 m,激光选择波长为 500 nm,采样点数为 128。仿真中加入了大气湍流引起的随机相位误差

和探测器的测量噪声,其中大气湍流噪声选择大气相位屏近似;在目标表面加入随机噪声,其值大小为仿真目标灰度的百分之一来仿真激光散斑对图像的影响,实际系统可以通过大面积的接受装置来降低激光散斑对成像质量的影响;图像重构算法为最小二乘法同时应用噪声加权平均的 wiener 波前重构的算法来提高相位估计精度。

基线配置为 33×17 的 T 形阵列,光束数量为 6 光束,具体配置如图 4 所示。

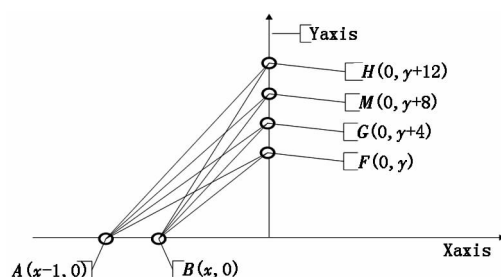


图 4 6 光束 T 形发射阵列配置

Fig. 4 6 T-beam emission array configurations

在衍射极限条件下,不同的发射光束数量,方阵成像结果,发射器等间隔配置以及多光束在改变空间频率条件下所获得的图像如表 1 所示。仿真目标如图 5 所示。



图 5 仿真目标

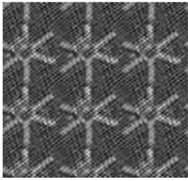
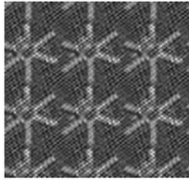
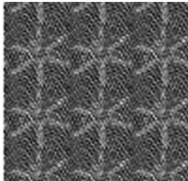
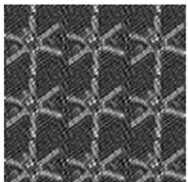
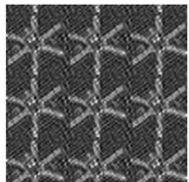
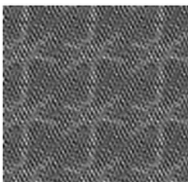
表 1 不同空间频率条件下的图像

Tab. 1 images under different frequency

Diffraction limited	3 beam	4 beam	5 beam	6 beam
Spatial frequency Continuous				
Spatial frequency Interval				

表 2 为光束增加后所获得的成像图像。

表 2 光束增加后所获得的图像
Tab.2 images acquired after increased beam

	3 square array beam	3 T-array beam	6 T-array beam
SNR = 100 Absence of laser speckle			
SNR = 100 Presence of laser speckle			

通过表 2 可以看出在光束数量增加时,激光散斑对成像质量影响较大,这主要因为同一时刻在目标表面不同拍频的干涉条纹增加,利用大面积接收器消除散斑影响得到的 T 形 6 光束在成像质量上面可完全满足需要。

6 总 结

通过参考 3 光束傅里叶望远镜成像原理,完成了 6 光束 T 形傅里叶望远镜计算机仿真,仿真结果证明系统完成成像时间由传统的 3 光束方阵 1.4 h 左右降低到 20 min 左右(包括光束切换时间)。发射光束数量的增多导致目标反射信号中傅里叶解调空间频率分量信息增加,同时容易造成空间频率间隔减小,导致相位抖动,图像信噪比有所降低。恰当选择发射器之间的距离有助于提高成像质量。当然成像系统除了受到发射器布局配置影响外,系统的硬件条件,光信息处理时间等也影响成像时间。要在系统中整体衡量而得到最短成像时间。仿真过程中遇到的一些问题和解决方法为更多光束的傅里叶成像技术和其他冗余度更小的发射器配置(如环型阵列)提供了宝贵经验,并且对下一步的 6 光束室

内和室外实验有着一定的参考和指导作用。

参考文献:

[1] D G Voelz. Principles and applications of unconventional laser imaging[J]. Proc. SPIE,1995,2566:74 - 79.

[2] Stephen D Ford,David G Voelz,Victor L,et al. Geo light imaging national testbed (GLINT) past, present, and future[C]. SPIE,1999,3845:1 - 10.

[3] Dong Lei,Liu Xinyue,Wang Jianli. The realization of fourier telescope technology in laboratory[J]. Opt. Precision Eng,2008,16(6):999 - 1002. (in Chinese)
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.

[4] R B Holmes,S Ma,A Bhowmik,et al. Analysis and simulation of a synthetic-aperture technique for imaging through a turbulent medium[J]. Opt. Soc. A. A,1966,13:351 - 364.

[5] E Louis Cuellar,Justin Cooper,James Mathis,et al. Laboratory demonstration of a multiple beam fourier telescopey imaging system [J]. Proc. of SPIE, 2008, 7094: 70940G - 3.