

doi: 10.3788/gzxb20144306.0601002

傅里叶望远镜大气湍流模拟实验

曾志红^{1,2}, 罗秀娟¹, 王保峰^{1,2}, 夏爱利¹, 程志远^{1,2}, 司庆丹^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:傅里叶望远镜是一种能对深空暗弱目标进行高分辨率成像的技术. 为了验证大气湍流对傅里叶望远镜系统的影响, 进行了实验室环境下大气湍流模拟实验研究. 在三束光傅里叶望远镜实验系统上, 通过控制射频驱动器的输出功率来模拟光强抖动, 改变射频驱动器的瞬时频率来模拟相位抖动. 给出了实验理论依据, 推导了湍流强度与实验变量的关系. 实验在弱湍流闪烁和相位抖动两种情况下, 分别给单束光和三束光加随机扰动并计算其 Strehl 比. 结果表明, 只在单束光上加扰动时重建图像影响不大; 在三束光上加扰动时, 弱湍流光强抖动对傅里叶望远镜系统的成像效果影响具有较大的随机性, 而相位抖动会严重影响系统成像质量. 因此, 消除光强抖动和相位抖动影响是图像重建算法改进应该考虑的一个关键因素.

关键词:傅里叶望远镜; 大气湍流; 湍流模拟; 闪烁; 相位抖动; 图像重构; 成像系统

中图分类号: TH743

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)06-0601002-7

Laboratory Simulation of Atmosphere Turbulence for Fourier Telescope

ZENG Zhi-hong^{1,2}, LUO Xiu-juan¹, WANG Bao-feng^{1,2}, XIA Ai-li¹,
CHENG Zhi-yuan^{1,2}, SI Qing-dan^{1,2}

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences (CAS),
Xi'an 710119, China*)

(2 *Graduate University of CAS, Beijing 100049, China*)

Abstract: Fourier telescope is a sort of high-resolution imaging technology for deep space object which is very small and dim. To verify the atmosphere turbulence net effect on Fourier telescope, the experimental demonstrations of atmosphere turbulence simulation were performed in a lab. Based on the laboratory system of three-beam Fourier telescope, the scintillation and the phase jitter were simulated by changing the radio-frequency driver output power and the instantaneous frequency, respectively. The detail of the experimental principle was presented, and the relation between the turbulent intensity and experimental variable was built. For different cases with random scintillation and phase jitter in weak turbulence, the experiments were conducted for single beam and three beams, and all the results' Strehl ratio were calculated. The experimental results indicate that, with single beam holding turbulence, there are no obvious change for all the reconstructed image; with three beams adding turbulence, the image quality of the Fourier telescope system is few influenced by weak scintillation, but is severe affected by phase jitter. As indicated, removing the phase and light intensity jitter effect is a key point of improving the image reconstruction arithmetic.

Key words: Fourier telescope; Atmosphere turbulence; Turbulence simulation; Scintillation; Phase jitter; Image reconstruction; Imaging systems

OCIS Codes: 010.1330; 110.0115; 010.1285; 100.2960

基金项目: 总装备部重大研究项目(No. 7131130)资助

第一作者: 曾志红(1988-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为傅里叶望远镜术的大气湍流抑制. Email: zzhls@163.com

导师(通讯作者): 罗秀娟(1964-), 女, 研究员, 主要研究方向为高分辨率光学成像技术和光电跟踪测量. Email: xj_luo@opt.ac.cn

收稿日期: 2013-10-17; 录用日期: 2014-01-17

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

傅里叶望远镜(Fourier Telescope, FT)是一种高分辨率激光干涉主动成像技术.它通过发射多束带有一定频差的激光,实现多组干涉条纹对目标的扫描,接收到的调制返回信号中包含了目标图像的空间频谱信息,经过傅里叶反变换后可重建出目标图像.1996年R B Holmes^[1]等人在JOSA上首次详细介绍了傅里叶激光干涉主动成像的基本原理并分析了大气湍流对FT的影响.随后,各种关于FT技术的研究成果相继发表^[2-10].FT室内验证实验从发射器同时发射3束光已经进展到同时发射5束光^[11-13].傅里叶望远镜技术的最终目标和优势是对深空目标成像,目前对FT的研究仍处于实验验证阶段.

大气湍流是影响空间目标成像分辨率的主要因素.因目标距离远大于激光照明时间相干长度,傅里叶望远镜非相干接收可不考虑大气湍流对下行链路激光传输的影响.而在上行传输链路,由于大气运动产生的湍流引起大气不同区域折射率的随机起伏,使得激光光束在随机大气中传播时,会产生一系列的光束质量退化效应,主要有光束扩展、光束漂移、到达角起伏、相位起伏和光强闪烁等^[14].光束扩展使通过大气传输的激光光强度降低、散射回波信号减弱,从而降低系统的接收信噪比.可通过提高发射功率,增大接收面积等手段对光束扩展的影响进行改善;光束漂移会造成发射激光指向准确度的降低,运用闭环指向手段(如运用极大似然法统计回波信号实现光束闭环瞄准)可以有效减小指向误差.在图像处理时,亦可用切趾滤波进一步降低光子噪声引起的光束漂移影响;到达角起伏会引起干涉条纹间隔的改变.傅里叶望远镜通过相位闭合技术来抑制到达角和相位起伏效应对成像质量的影响;

光强闪烁主要降低干涉条纹的调制度,引起接收信号直流量的增加,在频谱提取中可以通过滤波手段加以消除,同时在多光束FT系统中,采用四相位闭合算法可进一步降低闪烁对系统成像的影响.上述光强闪烁和相位起伏效应都是指其空间上分布产生的影响,对于光强和相位随着时间变化的效应,这些方法是不适用的.而实际的系统中,由于大气的相干时间有限,会使光强和相位随时间产生随机变化.特别是当FT系统的发射光束数增加时,所需调制频率数的大量增加,使得拍频的间隔减少,上行链路大气湍流引起的相位抖动很可能导致各个频率的混叠,从而造成成像质量大幅降低.因此,在实验室模拟大气折射率起伏导致的传输激光相位抖动和光强抖动(光强闪烁)这两个主要上行链路湍流效应、研究其对傅里叶望远镜的影响是非常必要的,不仅可以直观地了解这些效应对系统的影响,还可检验相位闭合图像重建算法的适用性和鲁棒性,有助于对算法做出相应的改进.

传统的大气湍流物理模拟方法成本较高,且大气所有效应都被同时加入,不易考察单一大气湍流效应的影响,本实验介绍的方法对上行链路的两个重要效应分别进行了模拟和分析,为深入研究傅里叶望远镜系统提供依据^[13].

1 实验原理

图1为FT系统湍流模拟实验结构,用来模拟相位和光强在时间上的变化.对于三束光FT系统,需要注意的是,每束光照射在目标上的光强要尽量相等,偏振片和半波片1、2可用来调节光强大小.激光从激光器出来后经2个分光镜分为三束光,然后分别经过一个声光调制器(Acousto-Optical Modulator, AOM).实验中,频率合成器产生激光束的调制频率.为了模拟大

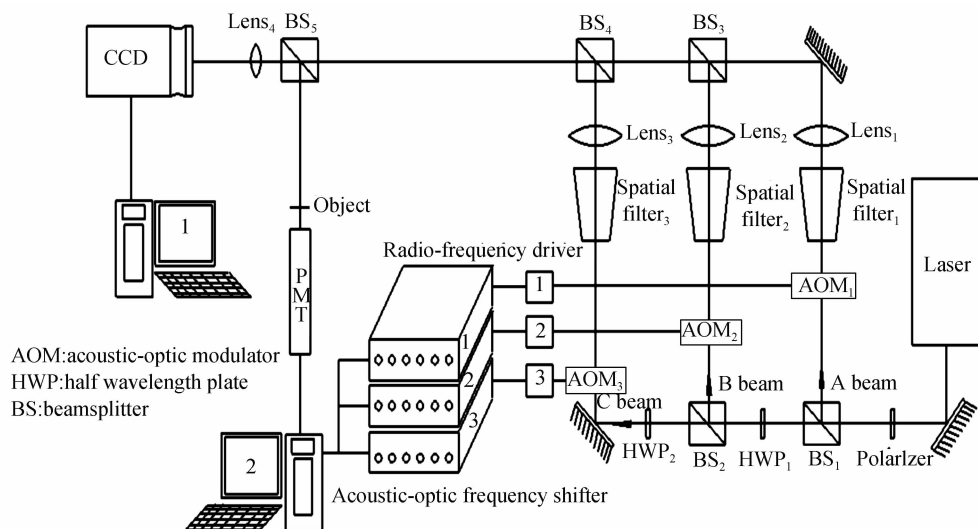


图1 FT系统湍流模拟实验结构

Fig. 1 FT system turbulence simulation experimental structure schematic diagram

气湍流在目标上产生的光束强度变化,额外定制了频率合成器的功率衰减模块. AOM 输出的一级衍射光的强度和相位变化可以通过调节频率合成器的输出功率和频率来改变. 频率合成器给三束光 A, B, C 分别在 40 MHz 调制频率上加入移频 0, 50 和 150 kHz, 这样三束光产生的拍频分别为 50, 100, 150 kHz. 透镜 1~3 使从空间滤波器出来的发散光平行化, 必要的情况下可以在其后加入小孔来调节打在目标上的光斑大小. 从整个结构上来看, 图 1 在三束光 FT 系统实验的基础上对计算机 2 增配了 NI-PCI-6722 模拟信号采集卡和 NI-PCI-6509 数字信号采集卡, 并通过 LabVIEW 控制软件来实现对光强和相位随机变化的控制. AOM 同时作为强度调制器和移频器来使用, 实时调节频率合成器的衰减, 使 AOM 的射频驱动器连续产生强度抖动的电压, 用以模拟光强闪烁; 另外, 每毫秒更新一次频率合成器的频率, 用以模拟大气湍流引起的光束相位抖动.

1.1 闪烁模拟

在 FT 实验中, 进入空间滤波器的光是从 AOM 出射的一级衍射光. 声光调制器输出的一级衍射光强度 i_1 和射频驱动器输入包络电压 E_{RF} 的关系为

$$i_1 = \sin^2(kE_{RF}) \quad (1)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 是波长. 实验中采用的激光波长为 532 nm. 而射频驱动器输入包络电压 E_{RF} 与频率合成器输出功率 P 的关系为

$$P = E_{RF}^2/R \quad (2)$$

式中, $R = 50 \Omega$. 频率合成器的输出功率 P 与其输入衰减 P_{dBm} 又存在关系为

$$P_{dBm} = 10 \lg P + 30 \quad (3)$$

结合式(1)~(3)可以得到

$$i_1 = \sin^2(k \sqrt{R 10^{0.1P_{dBm}-30}}) \quad (4)$$

所以, 可通过调节频率合成器的功率衰减来模拟光强闪烁.

由于湍流是在实时随机变化的, 其引起光强度变化的频谱在本质上可以看成是截止频率为 200 Hz 时的均匀白噪音, 用式(4)来直接衡量大气产生的光强闪烁是不适合的. 为了便于直观看到闪烁的大小, 调节 P_{dBm} 变化的均值和标准偏差, 使得在接收面上测量的闪烁值达到要求值, 同时, 使模拟的闪烁与湍流强度相互对应.

闪烁指数, 即辐照度的标准化方差, 其计算式为

$$\sigma_1^2 = \langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 - 1 \quad (5)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 表示求均值, I 为光强. 当光通过目标进入光电倍增管后, 采集卡对信号进行采集, 同时用式(5)可计算出光强闪烁值.

实验中, 湍流强度由 1 000 km FT 仿真系统的缩小比例参量得出. 1 000 km FT 系统发射的光近似为

平行光, 在弱湍流理论下, 其湍流引起的闪烁的表达式为

$$\sigma_1^2 = \sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (6)$$

式中: C_n^2 为湍流的折射率结构常量, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 是波长 (1 000 km 系统用的波长为 1 064 nm), $L = 10^6$ m 为传输长度. σ_R^2 为 Rytov 方差, 它是判断湍流强弱的标准. 对于平面波, 当 $\sigma_R^2 \ll 1$ 时为弱湍流, $\sigma_R^2 \approx 1$ 为中等湍流, $\sigma_R^2 \gg 1$ 为强湍流. C_n^2 在实际中是随着高度变化, 在这里只计算它在整个系统中代表各个湍流强度的范围, 并且取其中的一个典型值来进行实验. 为了求出湍流强度对应在整个路径上的等效折射率结构函数, 设 $\sigma_R^2 = 1$, 得到中等湍流 $C_n^2 \approx 10^{-19} \text{ m}^{-2/3}$. 在弱湍流范围 $C_n^2 \ll 10^{-19} \text{ m}^{-2/3}$ 中取 $C_n^2 = 10^{-21} \text{ m}^{-2/3}$ 代表弱湍流, 并使用本实验的光波长 532 nm, 代入式(6), 可以求得 $\sigma_1^2 = 0.022$. 若需要对强湍流进行模拟, 需要用的强湍流闪烁公式为

$$\sigma_1^2 = \exp \left[\frac{0.49 \sigma_R^2}{(1 + 1.11 \sigma_R^{12/5})^{7/6}} + \frac{0.51 \sigma_R^2}{(1 + 0.69 \sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \quad (7)$$

式中: $\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$, 其计算方法与弱湍流情况下类似, 不再赘述.

1.2 相位抖动模拟

通过调节频率合成器的瞬时频率可实时改变激光束经过声光调制器输出的一级衍射光光程差. 具体的关系式为^[8]

$$v_l(t) = \frac{1}{\lambda} \frac{d(\text{OPD}(t))}{dt} \quad (8)$$

式中: $v_l(t)$ 是频率的变化量, λ 是波长, $\text{OPD}(t)$ 是大气湍流引起的光程差随时间变化的函数, $d(\text{OPD}(t))$ 是在 dt 时间内 $\text{OPD}(t)$ 的变化量. 光程差实际上是随机变化的, 因此实验中, 相位抖动的程度用频率变化的均方根值 (Root Mean Square, RMS) 来标定, 而该均方根值与湍流强度存在一个对应关系.

为了确定各种湍流强度对应的频率变化范围及其均方根值, 可用 MatLab 软件模拟出具体数值, 然后把这些值输入控制计算机 2 中的 LabVIEW 程序, 达到不同程度的模拟. 当激光在大气中传输时, 大气湍流可以近似为多个相位屏, 用谱方法和 Kolmogorov 湍流模型形成相位屏, 每个屏的光学厚度 (引起的光程差) 可表示为^[15]

$$\text{OPD}(x) = \text{Re} \left[\text{FT} \left(\sqrt{S_k(\mathbf{k})} \times \sqrt{-2 \ln(a_1(\mathbf{k}))} e^{i2\pi \times a_2(\mathbf{k})} \right) \right] \quad (9)$$

式中: $a_1(\mathbf{k})$ 和 $a_2(\mathbf{k})$ 是均匀分布的随机函数, FT 是傅立叶变换, $S_k(\mathbf{k})$ 是湍流的功率谱, 其表达式为

$$S_k(\mathbf{k}) = 0.38 \lambda^{-2} C_n^2 k^{-11/3} \quad (10)$$

式中: C_n^2 为折射率结构常量. 由于这种功率谱方法对湍流的低频部分模拟不足, 所以在模拟中还加入了三次谐波来进行补偿.

当光波通过大气层时,大气湍流扰动引起光波波前相位随时间迅速变化.对于实际的大气湍流,由于目标的运动及风速的影响,使得大气湍流效应在大气的去相干时间 t_0 内计算有效,否则需要重新计算. t_0 的值是毫秒数量级的,且 PCI-6509 卡的速度能够满足每毫秒变化一次频率的要求,所以取 t_0 为 1 毫秒,也就是式(8)中的 dt 为 1 毫秒.使三束光的最小变化量同时为 10 Hz, $C_n^2 = 10^{-21} \text{ m}^{-2/3}$ (如上分析出的弱湍流),激光波长为 532 nm,对式(8)进行重复模拟,得出弱湍流频率变化范围为 100~1 000 Hz,其 RMS 范围为 300~350 Hz.若 $C_n^2 = 10^{-19} \text{ m}^{-2/3}$,得出频率变化范围为 1 000~7 500 Hz,其 RMS 范围为 3 000~3 500 Hz.

2 成像质量的评价

在描述图像质量中评价参量中,斯特列尔比 (Strehl ratio) 以其简单有效的优点被广泛使用.本文使用 Strehl 比来评价重建图像的影响程度. Strehl 比是两图像强度分布互相关谱的归一化结果.它通过用重建图像的强度分布与衍射极限目标(真实图像)的强度分布进行比较得到,表达重建图像与原目标图像相对的强度分布相似度.在计算之前,真实图像的大小和方向都需要调整到与重建图像匹配. Strehl 比的具体计算公式为

$$S = \frac{|\iint O_N(x,y)O_E(x,y)dx dy|^2}{\iint O_N(x,y)O_N^*(x,y)dx dy \iint O_E(x,y)O_E^*(x,y)dx dy} \quad (11)$$

式中: $O_N(x,y)$ 为无误差重建图像的强度分布, $O_E(x,y)$ 为有误差重建图像的强度分布, $O_N^*(x,y)$ 和 $O_E^*(x,y)$ 分别为前两者频谱分布的共轭. Strehl 比的值在 0 到 1 之间,当两图像强度分布相同时,即 $O_N(x,y) = O_E(x,y)$, Strehl 比为 1. Strehl 比越接近 1,重建像与目标像越相似,则系统的成像质量越好.

3 实验结果与分析

实验使用的原始目标为卫星图的一种简化形式(图 2).目标由硫酸纸打印而成,大小为 3 mm,背景被全部涂黑.为了便于快速比较,用仿真程序对图 2 进行了 5×5 (T 发射阵列两轴单臂上发射孔径数目均为 5) 仿真,得出的衍射极限图像如图 3(a)所示,因孔径数目太少,图像的清晰度不太高,但不影响分析结果,其相对原始目标的 Strehl 比为 0.811 4.在不加任何大气的情况下在实验室对目标进行 5×5 成像,得到图 3(b).在实验室成像的过程中,成像质量受很多因素的影响,比如激光器、半波片、衍射效率、频率合成器的稳定性,光束准直误差以及光电倍增管噪音等,会使得重建出的图达不到衍射极限,且每次实验结果图都有细微的差别,但是图 3(b)还是比较理想的,其 Strehl 比为 0.785 9.为了得出好的实验结果图,每束光的光强要

调整好,不仅要保证其照射在目标上的光强相等,而且光强也不能太大,否则重建结果图容易成一个圆斑.为了定量评价闪烁和相位抖动的影响,对以下每个实验结果图都计算了其 Strehl 比,计算时都采用原始图像(图 2)作为真实图像.

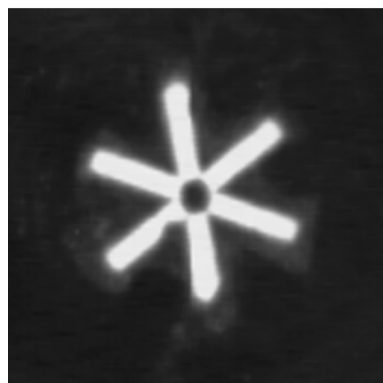


图 2 实验原始目标图

Fig. 2 Experimental original target image

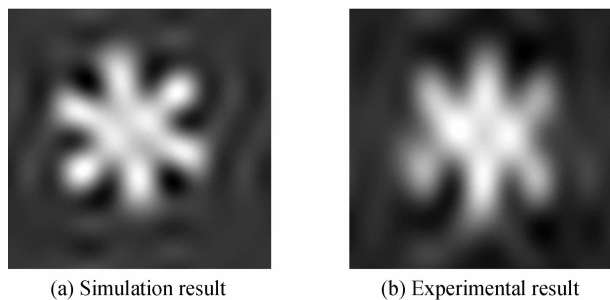


图 3 无大气湍流的目标重建图

Fig. 3 No atmospheric turbulence reconstruction figure

3.1 光强闪烁模拟实验结果与分析

在光强闪烁模拟实验中,首先在三束光中的一束光上加入强度起伏,用采集的数据进行图像重建.最后,为了更真实的模拟闪烁对傅里叶望远镜系统的影响,给 3 束光同时加入闪烁,并重建出其目标图像.以下所有实验中,在加上强度起伏前,每束光在目标面上的光强都与图 3(b)相同,衍射效率调到最大(大约 80%左右).在连接上功率衰减控制模块后,AOM 衍射效率、一级衍射光出射角度和强度都会变化,需要进行重新调节.

图 4(a)为只在 A 光束上加入弱湍流闪烁的实验结果图.在采集数据前,调节计算机 2 上 LabVIEW 程序中幅值均值和标准偏差,使得 A 光束的光强均值与不加闪烁时相同,其他两束光的光强也与之相同,闪烁指数 σ_I^2 值为 0.022 左右.图 4(b),(c)分别为只 B 光束和 C 光束上加入弱湍流闪烁.在实际的系统中,三束光是同时受到大气的影响的,由于各个光束存在一定的相对位置,且湍流是随机变化的,所以各个光束受到的影响可看成是相互独立的.图 4(d)为三束光同时加上弱湍流闪烁时的目标重建图,三束光的闪烁是独立控

制的.图4的Strehl比值分别为0.769 3,0.776 7,0.766 8和0.715 4.

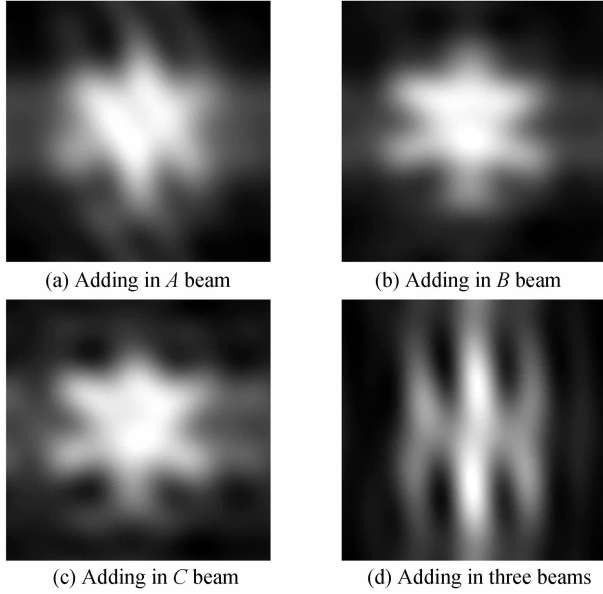


图4 加入弱光强闪烁后的实验结果图

Fig. 4 Experimental results figures in weak scintillation

需要指出的是,由于实验中激光器的发散角较大,尽管采取了加小孔等措施,在对一级衍射光准直的时候,仍会出现准直误差,也就是使三束光同时聚焦到CCD面上时,光束两两之间在目标上产生的干涉圆斑大小不一,很可能使重建的图像出现某个方向拉长的现象(如图4(d)).同时,由于闪烁指数是一个统计量,加入的光强变化是满足这个条件的随机数,导致每次实验的结果图也带有随机性.图4(a)~(d)都为多次重复实验中的一个图.为了更好地说明弱湍流闪烁对系统成像的影响,在1 000 km的三束光FT系统仿真程序中加入与以上实验同等强度的闪烁,并重建出图像.在仿真中给三束光同时加上相对独立的闪烁,多次运行,图5给出其中相差较大的两次结果图,其Strehl比值分别为0.808 1和0.729 4.从图4和图5的整个结果来看,在弱湍流闪烁的影响下,整个算法基本可以解调出目标图像,但其存在的随机性要求算法进一步的改进.

若三束光加入了光强起伏,采集到的数据就有偏差,得到的目标傅里叶分量测量值也不一样.假设A、B、C光束的振幅偏差量分别为 E'_1 、 E'_2 、 E'_3 ,那么光束AB之间的存在光强偏差 $\Delta I_{12} = E_1 E_2^* + E'_1 E_2^* + E_1 E_2^*$,光束AC、BC同理,则带误差的回波信号为

$$S'(k, t) = c \int_0^T d\tau \int dx O(x) [(E_1 + E'_1) \exp [i\omega_1 \tau + ik_1 x] + (E_2 + E'_2) \exp [i\omega_2 \tau + ik_2 x] + (E_3 + E'_3) \exp [i\omega_3 \tau + ik_3 x]]^2 \quad (12)$$

式中:空间的积分范围为目标区域, c 为比例常量.实验中,由于 E'_1 、 E'_2 、 E'_3 随时间1 ms变化一次,而数据采样

周期远大于1 ms,式(11)对时间积分时,会变得十分复杂,多出很多杂项.尽管这些项较小,用传统算法解调后,还是会对重建结果产生影响.当采样周期控制在1 ms内时,回波信号可积分为

$$S'(k, t) = c' \left\{ \left(3 + \frac{\Delta I_{123}}{I_0} \right) O(0) + \left(1 + \frac{\Delta I_{12}}{I_0} \right) O_{12}(k) \cdot \exp \left[i\omega \left(t + \frac{T}{2} \right) + i\varphi_{12}(k) \right] + \left(1 + \frac{\Delta I_{23}}{I_0} \right) \times O_{23}(k) \cdot \exp \left[i2\omega \left(t + \frac{T}{2} \right) + i\varphi_{23}(k) \right] + \left(1 + \frac{\Delta I_{13}}{I_0} \right) O_{13}(k) \cdot \exp \left[i3\omega \left(t + \frac{T}{2} \right) + i\varphi_{13}(k) \right] + c \cdot c \right\} \quad (13)$$

式中: $c' = c I_0 T \sin c(\omega T/2)$, $I_0 = |E_1^2| = |E_2^2| = |E_3^2|$ 为发射光在目标平面的光强, $\Delta I_{123} = \Delta I_{11} + \Delta I_{22} + \Delta I_{33}$, $c \cdot c$ 为其前三项的共轭.利用回波信号的 N 点采样,且 N 满足 $N\omega T = 2n\pi$ 时,可以得到目标傅里叶分量的测量值 $M(k)$,最后得出带误差的三重积 $R'(k_m)$ 为

$$R'(k_m) = \frac{M'_{1m}(k)}{M'_{12}(k) M'_{2m}(k)} = \frac{\left(1 + \frac{\Delta I_{1m}}{I_0} \right)}{\left(1 + \frac{\Delta I_{12}}{I_0} \right) \left(1 + \frac{\Delta I_{2m}}{I_0} \right)} \cdot R(k_m) \quad (14)$$

式中: $R(k_m)$ 为不带误差的三重积.从式(14)中可以看出, $R'(k_m)$ 比 $R(k_m)$ 多了一个系数,且这个系数随着发射孔径位置 m 随机变化.这种随机性,使得相位闭合过程中,迭代产生的影响具有如图5所示的随机性.对于这种随机性,采用全局相位闭合算法能有很大的改善^[16].

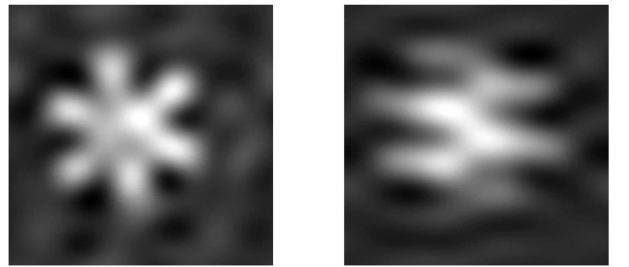


图5 三束光同时加入弱光强闪烁后的5×5仿真结果图
Fig. 5 Simulation results with three beams adding weak scintillation

3.2 相位抖动模拟实验结果与分析

各种实验条件与闪烁模拟实验相同.在最初的实验中,加入快速频率变化后,出现信号的能量在拍频的一个范围内分解分布现象,而且重建出的图像都是条纹,没有任何目标图像信息.分析原因后,对解调算法进行了离散频谱能量校正,把拍频附近一定范围内频率信号的能量都叠加在该拍频上,再进行实验,重建出了目标图像.分别只在三束光中的一束上加频率变化,变化幅度 Δf 为1 000 Hz (± 500 Hz),RMS为1000

左右.得到对应的 5×5 重建图像如图 6. 图 6(a)~(c) 的 Strehl 比值分别为 0.782 5, 0.739 0 和 0.778 1.

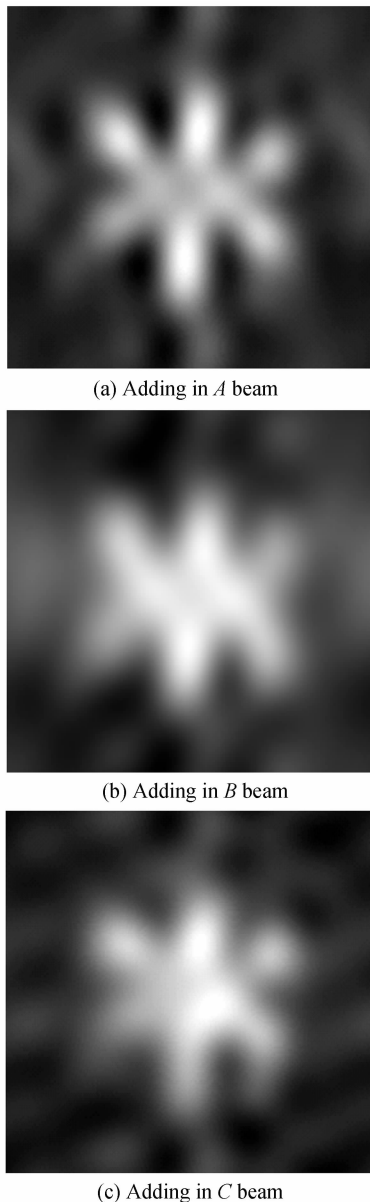


图 6 加入弱相位抖动后的实验结果图

Fig. 6 Experimental results figures in weak phase jitter

最后,给三束光同时加上频率变化并重建出结果图.为了说明频率变化范围不同产生的影响,在 RMS 都为 1 000 的情况下,分别使频率的变化范围 Δf 为 100 Hz、200 Hz、400 Hz 和 1 000 Hz,得到的重构图像为图 7. 图 7 的 Strehl 比值分别为 0.666 7, 0.596 0, 0.664 0 和 0.620 1.

从图 7 的四幅图可以看出,当三束光都加上相位抖动后,不管频率变化范围多少,在没有频率混叠的情况下,其重构出的图像质量很低,与目标图像比较,基本上完全失真,且经过多次重复实验,结果类似.

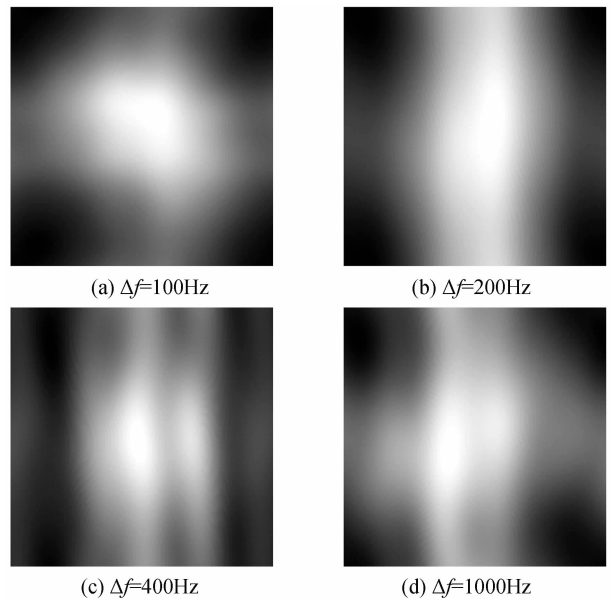


图 7 三束光同时加弱抖动后的实验结果图

Fig. 7 Experimental results with three beams adding weak phase jitter

FT 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.本实验是通过实时变化频率来模拟相位抖动,从某种角度上可以把它看成是频率合成器的不稳定性.它使得携带目标信息的频率不再是之前设定的 50 k、100 k 和 150 k,但在对目标进行重建的时候用的还是这三个频率,信号实际上却被其他频率调制,所以重建出目标图像会严重失真.图像重建算法通常利用时间平均来减弱散斑效应,因此,需设置高采样率并采集充足的数据周期.所以本实验设置的总采样时间为 28 ms,而模拟相位抖动的频率是每 1 ms 变化一次,导致每个数据周期对同一个信号采集了 28 种不同频率值,更使得解调误差放大.由此可见,合理的选择采样时间可以减少相位抖动的影响.另一方面,当光存在频率变化时,某“光束对”的目标傅里叶分量测量值不仅受到拍频的调制,还会受到其共轭项和其他两个空间频率变化的影响^[17].经过三相位闭合后,由于相位闭合采用固定光束顺序的迭代方法,频率变化带来的误差会被传递放大.

目前使用的算法还不能消除这种强度的相位抖动影响,近几年有文章介绍全相位谱分析方法,它利用全相位傅里叶变换(apFFT)具有‘相位不变’的优良性质,通过对信号作全相位傅里叶变换后直接提取信号的相位和幅值信息,再结合相位闭合算法直接重构目标.这是一种全新的傅里叶望远镜术数据处理方法,不依赖于频率的精确估计,具有优良的抑制频谱泄漏性能.

当频移量的误差为常量时,它可以滤掉共轭项和其他两个空间频率等高频项的影响,对相位抖动的影响有一定的消除作用.在实验中,把单次采样时间调整在1 ms内,即在频率变化之前完成采样(实验中的瞬时频率变化在一个采样时间内为常量).

4 结论

大气湍流室内模拟研究采用数值模拟的方法来模拟大气湍流对 FT 系统产生的辐照度起伏以及相位抖动的影响,并由此对图像重建算法的可行性和全面性进行试验.结果显示,通过调节频率合成器的输出功率衰减可以准确模拟光强闪烁,并且用传统的重构算法基本能重构出目标图像,但结果有一定随机性.在多光束傅里叶望远镜系统中,可采用一种新型的全局相位闭合算法来消除光强闪烁的影响.同时,用实时频率变化可模拟出相位抖动现象,但需要对目前的解调算法进行基于离散频谱校正的改进.改进后在单束光上加相位抖动基本对实验重建图像没有影响;当在三束光上同时加上相位抖动后,图像 Strehl 比下降 10% 以上且分辨不出目标.实验与分析为 FT 系统重建算法的改进和成像分辨率的提高提供重要依据.

参考文献

- [1] HOLMES R B, MA S, BHOWMIK A, *et al.* Analysis and simulation of a synthetic-aperture technique for imaging through a turbulent medium [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, **13**(2): 351-364.
- [2] FORD S D, VOELZ D G, GAMIZ V I, *et al.* Geo light imaging national testbed (GLINT): past, present, and future [C]. SPIE, 1999, **3815**: 2-10.
- [3] HOLMES R B, BRINKLEY T. Reconstruction of images of deep space objects using Fourier telescope[C]. SPIE, 1999, **3815**: 11-22.
- [4] BAKUT P A, MANDROSOV V I. Properties of Fourier-telescopic images of the remote rough objects [C]. SPIE, 1999, **3815**: 49-57.
- [5] GAMIZ V L, HOLMES R B, CZYZAK S R, *et al.* GLINT: program overview and potential science objectives[C]. SPIE, 2000, **4091**: 304-315.
- [6] THORNTON M A, OLDENETTEL J R, HULT D W, *et al.* GEO light imaging national testbed (GLINT) heliostat design and testing status[C]. SPIE, 2002, **4489**: 78-88.
- [7] MANDROSOV V I, CAMIZ V I. High resolution Fourier telescope imaging in strongly inhomogeneous atmosphere under high level of additive noises[C]. SPIE, 2004, **5572**: 49-56.
- [8] MATHIS J, CUELLAR E L, COOPER J, *et al.* Field experiment performance of the receiver elements for a Fourier telescope imaging system[C]. SPIE, 2005, **5896**: 58960F-1-58960F-12.
- [9] CHEN Bao-gang, DONG Lei, LIN Xu-dong, *et al.* Segmented mirror of Fourier telescope field experimental system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(001): 87-91.
陈宝刚,董磊,林旭东.傅里叶望远镜外场实验系统拼接主镜[J]. *光子学报*, 2011, **40**(001): 87-91.
- [10] DONG Lei, LIU Xin-yue, CHEN Bao-gang, *et al.* Field experiment and result analysis of Fourier telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1317.
董磊,刘欣悦,陈宝刚,等.傅里叶望远镜外场实验与结果分析[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1317.
- [11] MACDONALD K R, BOGER J K, FETROW M, *et al.* An experimental demonstration of Fourier telescope[C]. SPIE, 1999, **3815**: 23-29.
- [12] CUELLAR E L, STAPP J, COOPER J. Laboratory and field experimental demonstration of a Fourier telescope imaging system[C]. SPIE, 2005, **5896**: 58960D-1-58960D-15.
- [13] CUELLAR E L, COOPER J, MATHIS J, *et al.* Laboratory demonstration of a multiple beam Fourier telescope imaging system[C]. SPIE, 2008, **7094**: 70940G-1-70940G-12.
- [14] LI Yang, XIANG Li-bin, ZHANG Wen-xi. Effects of laser propagation through atmospheric turbulence on imaging quality in Fourier telescope [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(2): 292-296.
李杨,相里斌,张文喜.湍流大气中激光传输对傅里叶望远镜成像质量的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(2): 292-296.
- [15] STAPP J, SPIVEY B, CHEN L, *et al.* Simulation of a Fourier telescope imaging system for objects in low earth orbit[C]. SPIE, 2006, **6307**: 630701.
- [16] SPIVEY B, STAPP J, and SANDLER D. Phase closure and object reconstruction algorithm for Fourier telescope applied to fast-moving targets[C]. SPIE, 2006, **6307**: 630702-1-630702-16.
- [17] KONG Xin-xin, HUANG Min, ZHANG Wen-xi. Effect analysis of laser frequency-shift error on imaging quality in Fourier telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 127-132.
孔新新,黄旻,张文喜.傅里叶望远镜中激光频移误差对成像质量影响的分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(12): 127-132.