

doi:10.3788/gzxb20144303.0311001

## 傅里叶望远镜成像质量分析与评价

张羽<sup>1,2</sup>, 罗秀娟<sup>1</sup>, 夏爱利<sup>1</sup>, 曹蓓<sup>1</sup>, 程志远<sup>1,2</sup>, 曾志红<sup>1,2</sup>, 司庆丹<sup>1,2</sup>, 王保峰<sup>1,2</sup>

(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:**斯特列尔比通常被作为评价傅里叶望远镜成像质量的方法. 该方法通过求得复原图像与理想图像的相关度来评价成像质量, 主要用于计算机仿真分析. 然而, 在真实环境中往往因为不能预知被测目标的形貌特征, 使斯特列尔比像质评价方法失去作用. 本文针对实验室内傅里叶望远镜成像数据, 采用了两种不需要参考图像对比的方法: 灰度平均梯度法和拉普拉斯梯度模法描述复原图像包含细节信息的程度, 分析了非参照图像评价方法的可行性. 对同一复杂程度的目标, 分别利用计算机仿真及室内实测数据成像, 分析灰度平均梯度法、拉普拉斯梯度模法与斯特列尔比描述成像质量的一致性. 结果表明, 分析灰度平均梯度法、拉普拉斯梯度模法这样的评价与斯特列尔比评价趋势一致, 证明了分析灰度平均梯度法、拉普拉斯梯度模法无参照评价方法用于分析与评价傅里叶望远镜图像质量的可行性.

**关键词:**傅里叶望远镜; 像质评价; 灰度平均梯度; 拉普拉斯梯度模; 斯特列尔比; 激光拍频

中图分类号: O438.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)03-0311001-6

## Image Quality Evaluation and Analysis in Fourier Telescope for Laboratory Demonstration

ZHANG Yu<sup>1,2</sup>, LUO Xiu-juan<sup>1</sup>, XIA Ai-li<sup>1</sup>, CAO Bei<sup>1</sup>, CHENG Zhi-yuan<sup>1,2</sup>,  
ZENG Zhi-hong<sup>1,2</sup>, SI Qing-dan<sup>1,2</sup>, WANG Bao-feng<sup>1,2</sup>

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

(2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Strehl ratio is often used as a method for evaluation of the Fourier telescope imaging quality. This method computes the correlation of the reconstructed image and the ideal image to evaluate the image quality, which is mainly applicable in the computer simulation analysis. However, the object to be observed may be unknown in the real world, which means there is no ideal image for use. Based on laboratory imaging data, the feasibility of the non-reference image evaluation method applied to Fourier telescope is proposed and analyzed. The gray mean grads (GMG) method and Laplacian Sum (LS) are adopted to describe how much detail information the reconstructed image has. For the same object, Employ Strehl ratio and GMG, LS to evaluate the simulated image and the laboratory imaging result, respectively. Statistical results show that the two kinds of evaluations are identical in changing tendency. It proves the GMG and LS methods are applicable in Fourier telescope as a non-reference image evaluation.

**Key words:** Fourier telescope; Image evaluation; Gray mean grads; Laplacian sum; Strehl ratio; Laser beat frequency

**OCIS Codes:** 110.3175; 110.2960; 100.3010

基金项目: 总装备部重大项目 (No. 7131130) 资助

第一作者: 张羽 (1985-), 男, 研究实习员, 博士研究生, 主要研究方向为激光干涉成像. Email: yuzhang16@opt.ac.cn

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主动成像技术. Email: xj\_luo@opt.ac.cn

收稿日期: 2013-05-21; 录用日期: 2013-07-01

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

## 0 引言

傅里叶望远技术利用时域非相干探测的方法接收被测目标的能量信息,其影响成像质量的因素及图像评价方法与常规图像有所不同.傅里叶望远镜利用经不同频率调制的相干光源产生的多组移动干涉条纹快速扫描远距离目标表面,时域回波信号携带着目标频谱信息进入光电探测器.干涉条纹的空间频率决定了目标被采样的频谱,经迭代算法构成目标的频谱面,最后通过傅里叶逆变换将被测目标的空间信息复原<sup>[1]</sup>.目前国内外的研究机构针对傅里叶图像的质量评价有针对计算机仿真与实验室重建结果两种,前者主要运用斯特列尔比(Strehl Ratio, SR)来评价,后者多用图像信噪比来评价,如图像信噪比(ISNR)、调制传递函数(MTF)等<sup>[2]</sup>.然而基于信噪比的评价方法偏重于评估前端系统的参量,如探测器的转换效率、背景噪音等.傅里叶望远镜成像是依靠频谱分量采集的多少来决定其图像质量,本文探讨一种基于测试图像本身并能较为直观体现出图像细节信息量的无参照分析灰度平均梯度法(Gray Mean Grads, GMG)和拉普拉斯梯度模法(Laplacian Sum, LS)评价方法<sup>[3]</sup>.突破了实验室数据成像评价方法只限于计算机仿真的约束.此无参照方法主要针对地基深空目标探测,特别是没有已知图像信息对比的未知目标探测.同时可使前端的系统参量设置与实验结果评价价值结合,共同描述系统成像质量,有助于傅里叶望远镜系统设计的优化<sup>[4]</sup>.

## 1 理论仿真分析及评价

### 1.1 成像理论简介

傅里叶望远镜成像的原理是基于空间采样理论的应用,将目标的空间信息采样后转换为时域信号再进行非相干解调.假设激光束场强用指数信号表示为 $E = \exp(i\omega t)$ .那么实验中所采用的三束同源激光束可表示为 $E_1, E_2, E_3$ .它们在目标表面发生干涉,干涉条纹的能量分布为

$$I = |E_1 + E_2 + E_3|^2 = |\exp(i\omega_1 t) + \exp(i\omega_2 t) + \exp(i\omega_3 t)|^2 = \exp(i\omega_1 t) + \exp(i\omega_2 t) + \exp(i\omega_3 t) \cdot (\exp(-i\omega_1 t) + \exp(-i\omega_2 t) + \exp(-i\omega_3 t)) \approx \exp(i(\omega_1 - \omega_2)t) + \exp(i(\omega_2 - \omega_3)t) + \exp(i(\omega_3 - \omega_1)t) + c. c \quad (1)$$

式中

$$c. c = (\exp(i(\omega_1 - \omega_2)t) + \exp(i(\omega_2 - \omega_3)t) + \exp(i(\omega_3 - \omega_1)t))^*$$

实验中所采用三束激光通过频率调制,两两之间存在一个微小的频差,这样会使干涉条纹在目标表面快速移动,移动的速度与所设定的频率差成正比<sup>[5]</sup>.

图1是由三束调频光产生的三组干涉条纹的叠

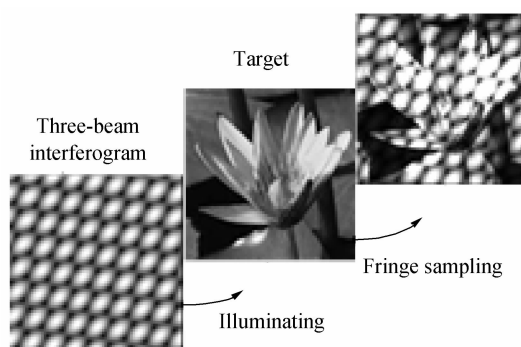


图1 干涉条纹组对目标采样

加.当其照射在被测目标表面时,目标一部分区域被照亮,一部分仍然为暗区,被照亮部分疏密由干涉条纹的空间频率决定.考虑到光束的相位,式(1)可以表达为

$$I(t) = \exp(i(\omega_1 - \omega_2)t + (k_1 - k_2)x + (\varphi_1 - \varphi_2)) + \exp(i(\omega_2 - \omega_3)t + (k_2 - k_3)x + (\varphi_2 - \varphi_3)) + \exp(i(\omega_3 - \omega_1)t + (k_3 - k_1)x + (\varphi_3 - \varphi_1)) + c. c \quad (2)$$

式中, $k_1 = k_0 \Delta x_1 / R$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$  分别为发射基线上三个发射孔径两两之间的距离.  $R$  是目标的观测距离.  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  是光束的初始相位.在一个周期内的一组目标反射回波可表示为

$$B(t) = \iint I(x, y) o(x, y) dx dy = \iint 2IO(x, y) dx dy \cdot \iint IO(x, y) \exp\{i[(\omega_n - \omega_m)t + \mathbf{x}(\mathbf{k}_n - \mathbf{k}_m) + \varphi_{nm}]\} dx dy + c. c = 2IO(\mathbf{k}=0) + IO(\mathbf{k}_n - \mathbf{k}_m) \exp\{i[(\omega_n - \omega_m)t + \varphi_{nm}]\} + c. c \quad (3)$$

若  $\mathbf{k}_{nm} = \mathbf{k}_n - \mathbf{k}_m$  and  $\omega_{nm} = \omega_n - \omega_m$ , 其中每一组  $\mathbf{k}_{nm}$  分别为  $\mathbf{k}_{12}, \mathbf{k}_{23}, \mathbf{k}_{13}$ ;  $\omega_{nm}$  分别为  $\omega_{12}, \omega_{23}, \omega_{13}$ . 那么

$$B(t) = 2IO(\mathbf{k}=0) + IO(-\mathbf{k}_{nm}) \exp\{i[\omega_{nm}t + \varphi_{nm}]\} + c. c \quad (4)$$

由式(4)知回波信号  $B(t)$  含有目标的频谱信息  $o(-\mathbf{k}_{nm})$ , 其在一个周期  $T$  内的积分为

$$S(\mathbf{k}_{nm}, t) = c \int_t^{t+T} B(t) dt = 2c \cdot I \cdot T \cdot O(\mathbf{k}=0) + c \cdot I \cdot T \cdot O(-\mathbf{k}_{nm}) \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega_{nm}T}{2}\right) \exp\left(i\left(\omega_{nm}\left(t - \frac{T}{2}\right) + \varphi_{nm}\right)\right) + c. c \quad (5)$$

其中当加载的频率差  $\omega_{nm}$  与采样周期  $T$  满足  $|\omega_{nm} * T| \leq 1$  时,  $\operatorname{sinc}\left(\frac{\omega_{nm}T}{2}\right) \approx 1$ , 那么得到回波信号为

$$S(\mathbf{k}_{nm}, t) = 2c \cdot I \cdot T \cdot O(\mathbf{k}=0) + c \cdot I \cdot T \cdot O(\mathbf{k}_{nm}) \exp\left(i\left(\omega_{nm}\left(t - \frac{T}{2}\right) + \varphi_{nm}\right)\right) + c. c \quad (6)$$

式(6)表明了两束光在某种基线配置的组合下(其矢量为  $\mathbf{k}_{nm}$ )采集到的目标频谱信息.在实际测量中,进入到光电探测器的是用三组干涉条纹提取的目标信息,即  $S_1(\mathbf{k}_{nm}, t), S_2(\mathbf{k}_{nm}, t)$  与  $S_3(\mathbf{k}_{nm}, t)$ . 通过对成百上千的

三组信息的相位闭合以及相应的迭代运算<sup>[6]</sup>,可以构成目标的频谱面  $O(f_x, f_y)$ , 最后通过傅里叶反变换的到目标的空间分布信息  $O(x, y)$ .

## 1.2 计算机仿真结果的斯特列尔比评价

计算机仿真与实验均采用三光束  $T$  型阵列的基线配置,如图 2<sup>[7]</sup>. 经频率调制的三个激光发射端分布在阵列的臂上. 在正式扫描目标频谱分量之前,首先将三光束依次排列在横轴上,在图 2 象限分量扫描时,灰色方块代表水平轴( $x$  轴)扫描光,设定的频率偏移最小;黑色方块代表竖直方向( $y$  轴)扫描光,设定的频率偏移最高;圆形代表固定基准光,频率偏移值居中. 扫描方式为:基准光始终位于阵列的中心 0 点,当纵轴光束处于位置 1 时,横轴灰色光束从 -7 位置遍历到位置 7(不经过中心 0 点)并记录每一组位置的采样值以便进行迭代运算;之后纵轴光束上移到位置 2,横轴灰色光束继续由 -7 遍历到 7;依次类推,当竖轴光束移至位置 7 时,已产生了  $14 \times 7 = 98$  组空间频率不同、方向不同的干涉条纹,这些干涉条纹从不同方向对目标进行频谱采样,反射回波经相位闭合以及重建迭代算法恢复出图像.

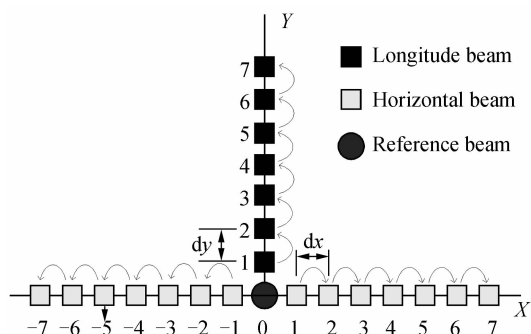


图 2 三光束基线配置

Fig. 2 Three beams baseline configuration

理想状态下,重建图像的分辨率与扫描光束在基线上移动的规模有关,当移动到更远的位置时,干涉条纹会变得更密,此时采集目标的细节信息越多. 为了记录方便,在描述一幅图像的成像条件,用  $M \times N$  来表示恢复此图像所扫描的最大孔径位置, $M$  表示  $x$  轴正向扫描孔径数, $N$  表示  $y$  轴扫描孔径数.

为了描述重建图像的质量,通常引用斯特列尔比 SR 来衡量,其物理意义是将原始图像和重建图像求归一化相关函数. 假设理想图像为  $I_o(x, y)$ , 重建图像为  $I_T(x, y)$ , 那么斯特列尔比可表示为<sup>[8]</sup>

$$SR = \frac{(\iint I_o(x, y) I_T(x, y) dx dy)^2}{\iint I_o(x, y) dx dy \cdot \iint I_T(x, y) dx dy} \quad (7)$$

即当  $SR=1$  时,两幅图像完全相同. 计算机仿真采用了带有 6 个翅膀的简单图像,光束在基线的不同扫描规模与复原图像的 strehl 比值如图 3 和表 1 所示.

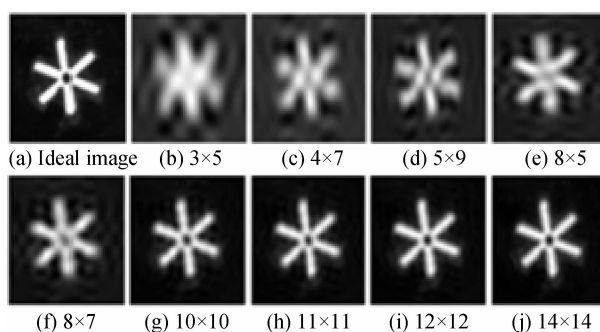


图 3 SR 与扫描规模的关系

Fig. 3 SR with transmitter scale

表 1 SR 与扫描规模的关系

Table 1 Strehl ratio with transmitter scale

	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Scale	3×5	4×7	5×9	8×5	8×7
SR	0.832 8	0.877 4	0.932 6	0.863 9	0.944 6
	(g)	(h)	(i)	(j)	
Scale	10×10	11×11	12×12	14×14	
SR	0.944 0	0.943 0	0.942 5	0.932 4	

图 3(a) 为原始图片, (b)~(j) 中图像的 scale 即为阵列扫描的规模  $M \times N$ . 从仿真结果可以看出大致的变化趋势, 即随着  $M, N$  值的增加 SR 也相应的增加, 然而从 (g)~(j) 的仿真结果中 SR 值并未随着  $M, N$  值的升高而降低, 反而略微有所下降. 后通过多次仿真与实验发现当  $M, N$  走到一定规模且  $M=N$  时, 重建图像的清晰度并不如  $M \neq N$  时的好. 实验表明: 当  $N : M \approx 7 : 5$  时, 基线配置较好, 图像质量好.

## 2 基于实测数据的像质评价

理想仿真状态下, 重建图像的质量可通过其与原始图像的 Strehl 比来评价. 实验室环境中所探测的是实物, 并且在真实环境中通常无法得知被测物体的外观, 因此为了便于分析实验条件下激光光束质量、频率调制效率和干涉条纹质量等各因素对重建图像产生的影响<sup>[9]</sup>, 搭建实验平台, 其实验照片与原理框图分别如图 4 与图 5.



图 4 三光束傅里叶望远镜成像实验照片

Fig. 4 Laboratory setup of three beam Fourier telescope

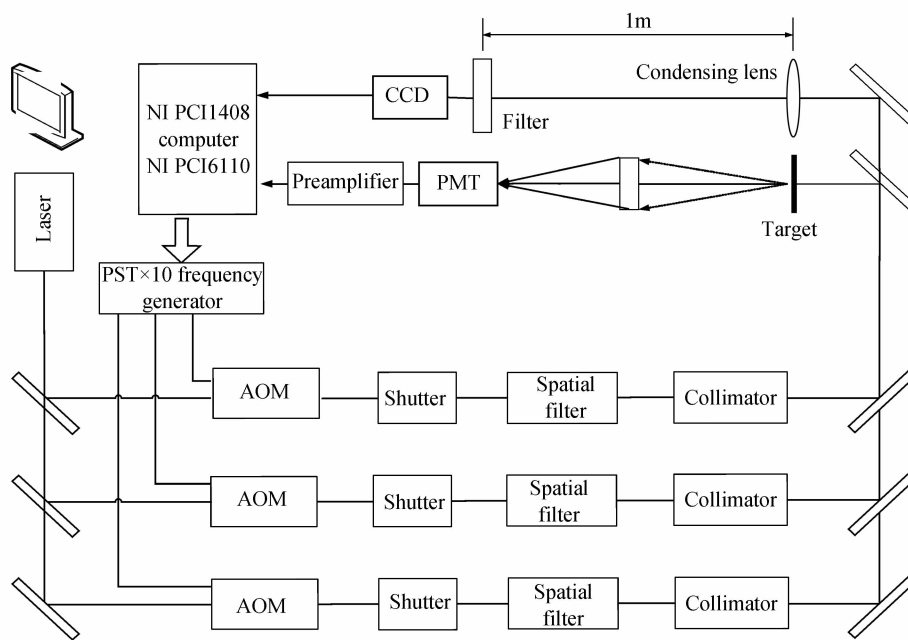


图 5 傅里叶望远成像实验原理

Fig. 5 Principle configuration of Fourier telescope imaging

实验采用 532 nm 固体激光器作为光源, 出射光被偏振分光棱镜 (PBS) 分成强度相等的三束光<sup>[10]</sup>. 每一束光被声光调制器 AOM 调制. 频率合成器 PTS10 的基频选为 40 MHz, 在此基础之上三台 PTS10 以 40 MHz, (40 M+50 k) Hz, (40 M+150 k) Hz 的频率来驱动三台声光调制器 AOM 的换能器件<sup>[10-11]</sup>. 当光束穿过 AOM 时产生布喇格衍射, 一级衍射光被调制, 当其分别通过光阑、空间滤波器、准直透镜后在目标处发生两两干涉, 其频率差分别为 50 kHz, 100 kHz, 150 kHz, 干涉光被分光棱镜分至目标与 CCD. 模拟目标为在 87% @532 nm 透过率的硫酸纸上打印出的几何图案, 如图 6.

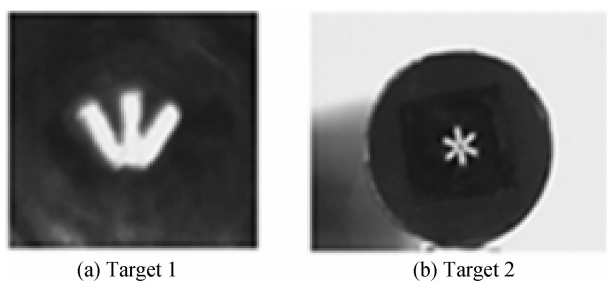


图 6 实验室模拟目标

Fig. 6 Simulated target in the lab

干涉条纹携带着目标空间分布信息进入光电探测器 PMT. CCD 标定三束光斑的距离与光电探测器探测到的信号频谱分别如图 7 和图 8.

图 7 中红色十字线为模拟的 T 型发射阵列, 计算机内 NI PCI1408 卡负责采集 CCD 图像, 通过旋转分光棱镜台的方位旋钮来控制三束光按照图 2 的移动方

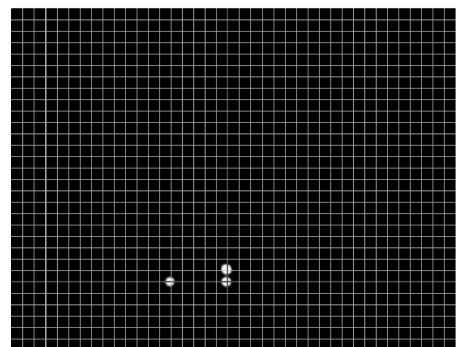


图 7 CCD 标定三光束位置

Fig. 7 Beam position calibrated by CCD

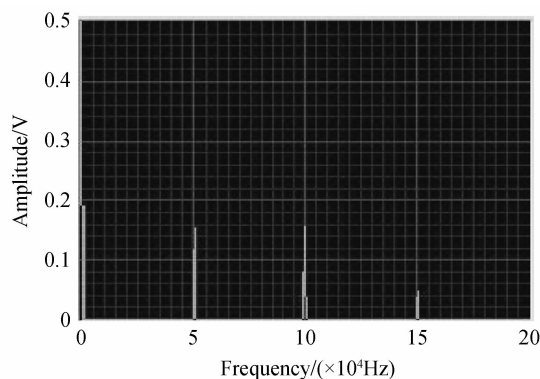


图 8 PMT 采集拍频信号的频谱

Fig. 8 Beat frequency Spectrum sampled by PMT

式遍历每一个空间采样点, 同时, 计算机内 A/D 转换卡 PCI6110 以设定的 4M 采样频率对 PMT 采集到的回波信号进行时域采样, 采样值经相位闭合与迭代运算构成目标频谱面, 后经傅里叶反变换得到被测图像, 如图 9.

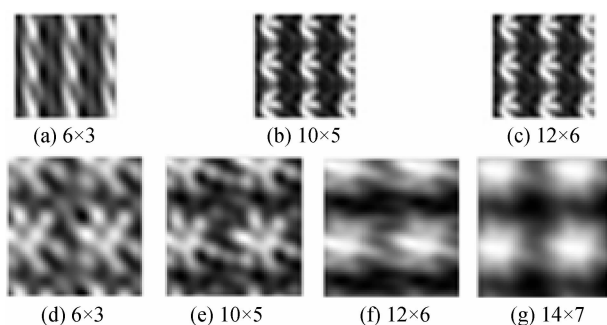


图9 两模拟目标实验室重建图像

Fig. 9 Laboratory reconstructed image of 2 simulated targets

在复原图像的相位闭合算法中,由于三光束的随机初始相位存在,虽不引入目标图像形变,却使目标图像产生整体平移<sup>[12]</sup>.因此将重构的傅里叶频谱进行反变换时将空间域周期延拓,使得在整个画幅中至少有一幅完整的目标图像.可知,即使有被测目标的原始图像,对计算机仿真的图像直接采用的 Strehl 比值评价方法依然不是很实用.

为了更好地描述实验结果的细节信息,下面将采用灰度平均梯度方法来对图像质量进行评价,进而讨论实验室环境中影响成像质量的因素.

GMG 值是一种无参照图像质量客观评价方法,是在真实探测环境下判断系统成像质量的潜在手段.它分别将图像长度和宽度方向上的相邻像素灰度  $g$  值作差后求平方和,再求均方根值. GMG 能够较好地反映图像的对比度和纹理变化特征,其值越大表示图像越清晰,复原图像的质量就越好.

GMG 的计算方法为

$$GMG = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=2}^{N-1} \{ [g(i, j+1) - g(i, j)]^2 + [g(i+1, j) - g(i, j)]^2 / 2 \}^{1/2} \quad (8)$$

以目标 2 为例,用 GMG 分析实验室成像质量,评价结果如图 10 和表 2.

图 10 中的 (a), (b) GMG 值较小,即体现的图像纹理信息不够充分,原因是由于激光阵列扫描的规模

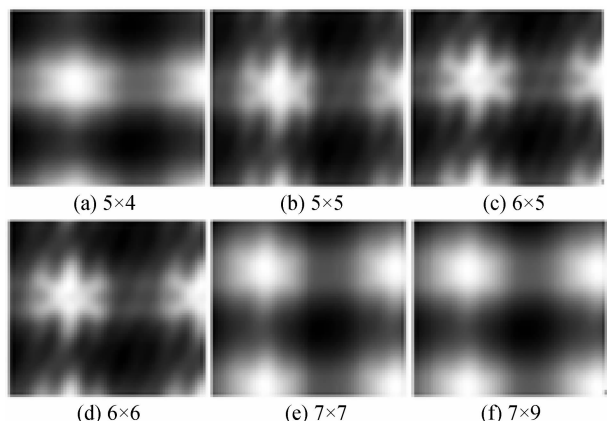


图10 灰度平均梯度(GMG)评价试验重建图像

Fig. 10 Reconstructed image evaluated by GMG method

表2 GMG与扫描规模的关系

Table 2 GMG with transmitter scale

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Scale	5×4	5×5	6×5	6×6	7×7	7×9
GMG	2.670 3	2.713 0	2.919 0	2.960 5	2.894 8	2.864 7

比较小,干涉条纹的宽度比较粗,在采集目标频谱信息时大多是低频信息,高频的细节还没有没采集到,因此图像轮廓基本能够体现出.(c),(d) 图像的 GMG 相对较大,随着阵列扫描规模的增加,较高频段的信息也参与到频谱重建中,图像的细节信息逐渐增多.而到了(e),(f) 尽管阵列扫描范围继续增加,理论上讲图像分辨率应该更高,然而无论从直观上还是 GMG 值都不如(c),(d) 的效果好.原因是采集高频信息的细干涉条纹幅值比低频时要小很多.解调出的差频信号受背景光噪音、探测器噪音影响较大,影响了有用目标信号的重建.

同样,作为另一种非参照的成像评价方法,LS 是对每一个像素在  $3 \times 3$  的邻域内采用拉普拉斯算子得到 8 邻域微分值,然后在图像范围内求和,表达式为

$$LS = \frac{1}{(M-2)(N-2)} \sum_{i=2}^{M-1} \sum_{j=2}^{N-1} |8g(i, j) - g(i, j-1) - g(i, j+1) - g(i-1, j) - g(i+1, j) - g(i, j-1) - g(i, j+1) - g(i-1, j+1) - g(i-1, j-1) - g(i+1, j-1) - g(i+1, j+1)| \quad (9)$$

这种非参照评价的依据为:若图像越清晰,轮廓越明显则每一像素附近的灰度值变化越大,LS 值就越大.对于图 10 中所恢复的图像,其 LS 值与基线扫描规模的关系如表 3 所示.

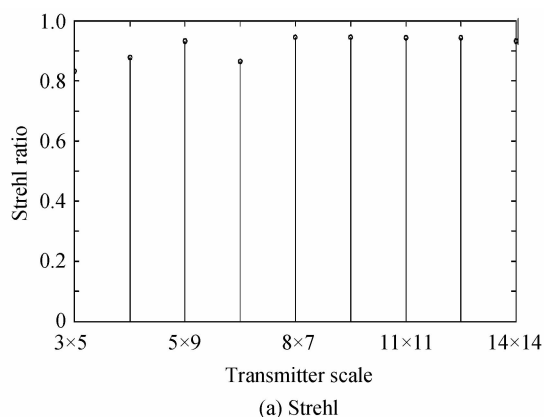
表3 LS与扫描规模的关系

Table 3 LS with transmitter scale

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Scale	5×4	5×5	6×5	6×6	7×7	7×9
LS	3.533 1	4.168 4	4.648 4	4.664 1	4.996 5	4.367 9

将计算机仿真图像的 Strehl 比值与实验中使用 GMG 和 LS 做一简单比较,如图 11.

由图 11 的结果可以看出 SR 评价是归一化评价



(a) Strehl

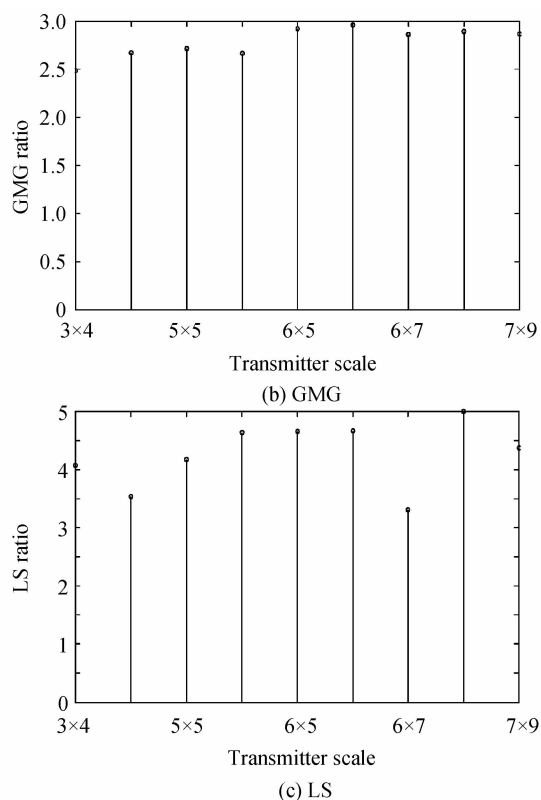


图 11 Strehl 与 GMG、LS 评价方法随发射器规模的变化趋势对比

Fig. 11 Comparison of Strehl and GMG\LS in transmitter scale changing tendency

法,GMG、LS属于非归一化评价法(图标的纵坐标绝对值不同),但在随着发射基线规模扩展的变化趋势方面,两者有一定的相似性。值得一提的是,在仿真的情况下SR值在高频区域稍有下降,这与发射器规模及目标复杂程度有关。当设定的发射基线较长,而目标较为简单时,干涉条纹的频谱信息比目标的频谱信息广,产生采样频谱冗余,从而导致Strehl比值略微下降;实验结果得出的GMG和LS的数据高频部分也有所降低,主要是高频信号噪声影响差频信号解调所致。

### 3 结论

傅里叶望远技术实施的最终目标是针对远程目标进行高分辨率成像。被测目标的空间形态可能未知,利用Strehl比值的有参照物评价方法具有一定局限性。本文介绍的GMG方法与LS方法无需参照物,重在体现重建目标的纹理细节信息的充分性,用其描述傅里叶频谱分量获取程度较为合理。对比GMG、LS与Strehl比两种图像质量评价结果,GMG、LS在评价实验结果中的变化趋势与Strehl比评价仿真结果的趋势大体一致,体现了在真实无参照物环境下采用GMG和LS方法的可行性。为傅里叶望远镜识别未知目标的成像质量提供了新的评价方法。

### 参考文献

- [1] MacDONALD K R, BOGER J K, FETROW M, *et al.* An experimental demonstration of Fourier telescope[C]. SPIE, 1999, **3815**: 23-29.
- [2] HOLMES R B, BRINKLEY T. Reconstruction of images of deep space objects using fourier telescope[C]. SPIE, 1999, **3815**: 11-22.
- [3] 耿则勋,陈波,王振国. 自适应光学图像复原理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [4] LUO Xiu-juan, MA Cai-wen, ZHANG Yu, *et al.* Design proposal of a 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.
- [5] LIU Bo, ZHU Yong, CHEN Jian-jun, *et al.* Analysis of tolerance of tilting mirror and experiment in novel Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 315-319.  
刘波,朱永,陈建君,等. 新型傅里叶变换光谱仪反射镜倾斜容限分析及实验[J]. 光子学报,2013, **42**(3):315-319.
- [6] CHEN Wei, LI Quan, WANG Yan-gui, *et al.* Experimental research of Fourier telescope imaging system[J]. *Acta Optical Sinica*, 2011, **31**(3): 03110011-03110015.  
陈卫,黎全,王雁桂,等. 傅里叶望远术成像系统的实验研究[J]. 光学学报,2011,**31**(3):03110011-03110015.
- [7] DONG Lei, WANG Bin, LIU Xin-yue, *et al.* Introduction to deconvolution techniques of multiple beam Fourier telescope[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(5): 440-444.  
董磊,王斌,刘欣悦,等. 多光束傅里叶望远镜的关键技术[J]. 中国光学与应用光学,2010,**3**(5):440-444.
- [8] WANG Xiao-wei, LI Quan, WANG Yan-gui, *et al.* Analysis and simulation on phase closure of Fourier telescope[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009, **31**(1): 38-42.  
王小伟,黎全,王雁桂,等. 傅里叶望远术中相位闭合分析及其仿真[J]. 国防科技大学学报,2009,**31**(1):38-42.
- [9] MA Lin, LIU Yan, LI Yang, *et al.* Analysis of frequency drift effects in the phase-generated carrier method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1): 34-37.  
马林,刘艳,李阳,等. 载波频率漂移对相位生成载波解调结果的影响分析[J]. 光子学报,2013, **42**(1):34-37.
- [10] YE Su. Research on target reconstruction of Fourier telescope[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 7-14.  
叶溯. 傅里叶望远术目标重建的研究[D]. 成都:电子科技大学,2010,7-14.
- [11] ZHANG Yan, YANG Chun-ping, GUO Jing, *et al.* Spectrum extraction mode for Fourier telescope in laboratory [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 571-576.  
张炎,杨春平,郭晶,等. 实验室中傅里叶望远术频谱抽取方式[J]. 强激光与粒子束,2011,**3**,**23**(3): 571-576.
- [12] CUELLAR E L, STAPP J, COOPER J. Laboratory and field experimental demonstration of a fourier telescope imaging system[C]. SPIE, 2005, **5896**: D1-D15.