

doi:10.3788/gzxb20154405.0511002

# 准相位闭合在傅里叶望远镜图像重构算法中的应用

于树海, 王建立, 董磊, 刘欣悦, 王亮, 李宏壮, 刘杰

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘 要:**为了采用 T 型激光发射阵列的傅里叶望远镜对深空暗、弱、小目标进行高分辨率成像探测, 研究了 T 型发射阵列情况下的图像重构算法. 借鉴点面激光发射阵列, 提出了准相位闭合概念, 分别得到了 T 型发射阵列的最小二乘法(LMS)和加权噪声的 Wiener 滤波图像重构算法, 完善了 T 型激光发射阵列的傅里叶望远镜成像系统, 为实际工程系统的实施奠定了技术基础. 在不同成像信噪比条件下对整体系统数值模拟发现: 相比直接傅里叶逆变换方法, 重构图像成像质量有所提升, 特别是当成像信噪比较低时, 如 SNR 为 50 时, LMS 和加权噪声的 Wiener 滤波方法重构图像的斯特里尔比分别提高了 7% 和 8.4%, 证实了该方法的可行性和正确性.

**关键词:**成像系统; 傅里叶光学; 傅里叶望远镜; T 型发射阵列; 图像重构

**中图分类号:** TH743; V557

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2015)05-0511002-7

## Application Informal Phase Closure about Image Reconstruction Algorithm Based on Fourier Telescopy

YU Shu-hai, WANG Jian-li, DONG Lei, LIU Xin-yue, WANG Liang, LI Hong-zhuang, LIU Jie  
(Changchun institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** To apply Fourier Telescopy (FT) based on T type laser transmitter array to detect remote targets of dim, weak and small in high resolution, a new image reconstruction algorithm is proposed. The image reconstruction algorithm of dot-plane type laser transmitter array is used for reference proposes a concept which is named informal phase closure (IPC). The least mean square (LMS) reconstruction method and weighted noise Wiener filter algorithm (Wiener) are obtained perfect the FT system imaging quality of T-type laser transmitter configuration. The image reconstruction algorithm will lay the technical foundation for the implementation of practical engineering system. By the numerical simulation the overall system under different signal to noise ratios (SNR) of imaging conditions, imaging quality is improved, when the imaging SNR is low, such as SNR is 50, compared to directly inverse Fourier Transform method, the Strehl Ratios (SR) of reconstruction images of using the LMS and Wiener algorithms are respectively increased by 7% and 8.4%. The simulation confirms the feasibility and validity of the LMS and Wiener algorithms.

**Key words:** Imaging systems; Fourier optics; Fourier Telescopy; T type transmitter; Image reconstruction

**OCIS Codes:** 110.0115; 070.1675; 140.3290; 280.4788

## 0 引言

现阶段国内外普遍采用地基大口径望远镜对卫星目标进行实时高分辨率成像探测, 并采用自适应光学技术克服大气扰动对成像的影响, 使成像分辨率接近

系统的衍射极限, 但还不具备对地球同步静止轨道卫星高分辨率成像探测的能力. 非传统光学成像中的傅里叶望远镜(Fourier Telescopy, FT)采用多束相干激光主动照明目标和非共相大面积反射镜接收返回信号的方式, 可对深空暗、弱、小目标进行高分辨率成像探

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(No. 2013AAXX1003)资助

**第一作者:** 于树海(1985-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为傅里叶望远镜关键技术及光电信号处理. Email: yushuhai\_0707@sina.com

**收稿日期:** 2014-12-05; **录用日期:** 2015-01-24

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

测,对地球同步静止轨道卫星的成像分辨率等效口径为 100m 左右的大口径望远镜,分辨率可以突破微弧度量级,并且不需要自适应光学<sup>[1-3]</sup>对光束高阶相位差异进行校正,降低了系统复杂性和制造成本,同时成像系统有着优良的扩展性.自提出 FT 成像技术概念后,R. Holmes 作为傅里叶望远镜提出人,在文献[4]中研究了傅里叶望远镜成像基础理论并进行了详尽的大气影响分析,最终在大气扰动影响下,数值模拟得到了质量很高的目标图像. Mikhail Belenkii<sup>[5]</sup>详尽报道了光束闪烁对傅里叶望远镜成像的影响,指出光束闪烁和散粒噪声对成像系统影响显著. David F. Olson 对发射器配置模式和重构算法的研究在文献[6]中体现较为详尽,分析了 T 型和 Y 型发射阵列的优劣. Kenneth R. Macdonald 在完成理论分析论证后在实验室内搭建实验平台对系统可行性进行了验证<sup>[7]</sup>,接着 E. Louis Cuellar 和 J. Mathis 进行了傅里叶望远镜成像系统外场实验<sup>[8-9]</sup>,当下行链路距离为 1.5km 时,重构图像的斯特里尔比达到了 0.97,证实系统不受大气下行链路扰动的影响.

随着研究的深入,国内学者敏锐地察觉到了 FT 成像的技术优势,进行了跟踪研究,取得了很好的成果.陈卫<sup>[10]</sup>首次将全相位谱分析技术引入到傅里叶望远镜成像领域,克服了光束移频偏差对成像质量的影响;本文作者<sup>[11]</sup>首次尝试采用非均匀采样技术降低了系统对采样频率的要求,特别适合多光束发射系统;张羽<sup>[12]</sup>研究证明了平均梯度法和拉普拉斯梯度法无参考评价傅里叶望远镜成像图像质量的可行性;陈卫<sup>[13]</sup>和董磊<sup>[14]</sup>分别在实验室内和外场实验方面做了较多的工作,证实了傅里叶望远镜系统的可行性;曾志红<sup>[15]</sup>在实验室环境下搭建了傅里叶望远镜成像平台,分析大气扰动对成像的影响,发现光强抖动和相位抖动是傅里叶望远镜成像系统的主要降质源.

现有实验验证工作中的激光发射方式基本都采用点面发射模式,图像重构算法也是基于点面发射模式下建立的,虽然点面发射模式在实验室中实现难度较低,但对于工程系统控制难度较大,系统成本和复杂度较高,因此实际的 FT 工程系统需要采用 T 型发射模式.但现有公开资料中鲜见基于 T 型发射模式<sup>[6]</sup>的图像重构算法研究,本文基于点面发射阵列重构算法,提出了“准相位闭合”概念,得到了最小二乘法 and Wiener 滤波两种重构算法,并通过数值模拟验证了其正确性.

### 1 傅里叶望远镜成像原理

FT 成像原理如图 1 所示,发射系统至少在不同位置同时发射 3 束相干激光照明目标,目标在照射的干涉条纹范围内移动、或人为地用声光频移器使一个光源相对另一个光源产生微小的频移,使得干涉条纹扫

描目标<sup>[16]</sup>.经目标散射后,将返回时域信号,实现了将目标的空间频率信息在时域上编码.通过快速傅里叶变换(FFT)即可提取目标不同的空间频率信息,再采用相位闭合技术消除光束间的粗大相位差异(Piston).通过改变激光束发射位置,抽取足够多的频率信息后,通过相应计算得到目标的单一傅里叶分量信息,再进行信号处理即可清晰重构目标图像.系统详尽的原理数学推导过程可参阅文献[4],全文均采用同时发射 3 束激光作为发射系统.

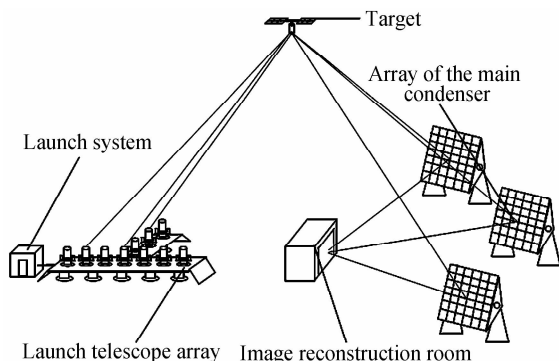


图 1 傅里叶望远镜成像原理图

Fig. 1 Principle figure of FT imaging system

点面和 T 型激光发射系统模型如图 2 所示,数字表示发射望远镜编号,半轴最大值为 16,同一坐标轴上的任意相邻两个望远镜间隔相同.

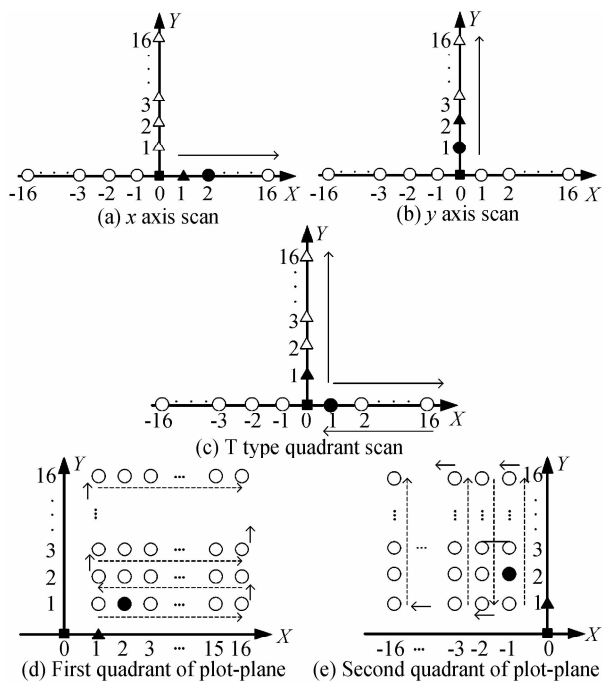


图 2 发射机构

Fig. 2 Lasers emitting mode concept figure

不论是采用点面发射还是 T 型发射模式,光束在坐标轴上的运动模式是相同的.当进行 x 轴扫描时,如图 1(a),两束光分别固定在原点(0,0)(方形)和(1,0)点(三角形)不动,扫描光束(圆形)从(2,0)沿着 x 轴正

向扫描.当进行  $y$  轴扫描时,如图 1(b),两束光分别固定在原点(0,0)(方形)和(0,1)点(圆形)不动,扫描光束(三角形)从(0,2)沿着  $y$  轴正向扫描.对  $x$  轴和  $y$  轴扫描时,原点光束即固定光束频率最低,扫描光束频率最高.

当进行 T 型象限扫描时,如图 1(c),一束光固定在原点(0,0)(方形)不动,另一束光(圆形)在  $x$  轴上扫描每一个点,第三束光(三角形)从(0,1)沿着  $y$  轴正向扫描且扫描整个  $y$  轴.进行象限扫描时, $y$  轴扫描光束频率最高, $x$  轴扫描光束频率最低.

当进行点面发射象限扫描时,分为第 1 象限和第 2 象限两种光束运动方式:

1)点面激光发射阵列模式扫描第 1 象限时,如图 1(d)所示,固定光束(方形)和剪切光束(三角形)分别位于坐标原点和  $x$  轴上的(1,0)点固定不动,扫描光束(圆形)从(1,1)点首先沿着  $x$  轴运动,当运动到点(16,1)后,沿着  $y$  轴向上运动到(16,2)位置,再反向沿着  $x$  轴运动到(1,2)位置.重复上述运动模式,直至运动到(16,16)处,这时就完成了第 1 象限的频率抽取工作.

2)点面激光发射阵列模式扫描第 2 象限时,如图 1(e)所示,固定光束(方形)和剪切光束(三角形)分别位于坐标原点和  $y$  轴上的(0,1)点固定不动,扫描光束(圆形)从(-1,1)点首先沿着  $y$  轴运动,当运动到(-1,16)点后,沿着  $x$  轴向左运动到(-2,16)位置,再反向沿着  $y$  轴运动到(-2,1)位置.重复上述运动模式,直至运动到(-16,16)处,最终完成了第 2 象限的频率抽取工作.

由于频谱的对称性:第 1 象限和第 3 象限互为共轭,第 2 象限和第 4 象限互为共轭,因此对 1、2 象限进行扫描后即可得到恢复图像的频谱矩阵.当采用点面激光发射阵列模式时,固定光束频率最低,扫描光束频率最高,剪切光束频率居中.

## 2 点面发射阵列重构算法

图 2 为点面激光发射阵列的发射系统模型.现阶段具有代表性的两种重构算法<sup>[7]</sup>,分别为最小二乘波前重构算法和利用加权平均的 Wiener 滤波方法.

最小二乘波前重构算法(Least Mean Square, LMS):

$$O_R(m\Delta k_y, n\Delta k_x) = \frac{1}{2} \left[ \frac{R_y(m, n)O_R((m-1)\Delta k_y, n\Delta k_x)O_R(\Delta k_y, 0)}{[1 + |R_y(m+1, n)|^2]} + \frac{R_y^*(m+1, n)O_R((m+1)\Delta k_y, n\Delta k_x)O_R(\Delta k_y, 0)}{[1 + |R_y(m+1, n)|^2]} + \frac{R_x(m, n)O_R(m\Delta k_y, (n-1)\Delta k_x)O_R(0, \Delta k_x)}{[1 + |R_x(m+1, n)|^2]} + \frac{R_x^*(m, n+1)O_R(m\Delta k_y, (n+1)\Delta k_x)O_R(0, \Delta k_x)}{[1 + |R_x(m+1, n)|^2]} \right] \quad (1)$$

式中,  $O_R(m\Delta k_y, n\Delta k_x)$  为重构目标的傅里叶分量,  $\Delta k_x$  和  $\Delta k_y$  分别为  $x$  和  $y$  轴方向对应的最小空间频率,  $R$

为相位闭合得到的比值,即

$$\begin{cases} R_y(m, n) = \frac{M(m\Delta k_y, n\Delta k_x)}{M(m\Delta k_y, (n-1)\Delta k_x)M(\Delta k_y, 0)} \\ R_x(m, n) = \frac{M(m\Delta k_y, n\Delta k_x)}{M((m-1)\Delta k_y, n\Delta k_x)M(0, \Delta k_x)} \end{cases} \quad (2)$$

如果可以准确估计系统噪声的方差并满足二阶矩统计特性,利用加权平均的 Wiener 滤波算法可以提高傅里叶分量相位估计精度,即

$$O_R(m\Delta k_y, n\Delta k_x) = |M(m\Delta k_y, n\Delta k_x)| \times \left[ Z[G_y(m, n)P_y(m, n)O_R((m-1)\Delta k_y, n\Delta k_x) \cdot O_R(\Delta k_y, 0) + G_y(m+1, n)P_y^*(m+1, n) \cdot O_R((m+1)\Delta k_y, n\Delta k_x)O_R^*(\Delta k_y, 0) + G_x(m, n)P_x(m, n)O_R(m\Delta k_y, (n-1)\Delta k_x) \cdot O_R(0, \Delta k_x) + G_x(m, n+1)P_x^*(m, n+1) \cdot O_R(m\Delta k_y, (n+1)\Delta k_x)O_R^*(0, \Delta k_x)] \right] \quad (3)$$

式中  $Z$  为归一化函数,  $Z[x] = x/|x|$ ,  $P$  为同时解调得到的三重积对应的归一化值,  $G$  为噪声加权函数.

$P$  和  $G$  计算方法如式 4 和 5 所示,  $\delta$  为噪声的方差.

$$\begin{cases} P_y(m, n) = Z[M(m\Delta k_y, n\Delta k_x)M^*((m-1)\Delta k_y, n\Delta k_x)M^*(\Delta k_y, n\Delta k_x)] \\ P_x(m, n) = Z[M(m\Delta k_y, n\Delta k_x)M^*(m\Delta k_y, (n-1)\Delta k_x)M^*(m\Delta k_y, \Delta k_x)] \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} G_y(m, n) = [|M((m-1)\Delta k_y, n\Delta k_x)M(m\Delta k_y, n\Delta k_x)|]/[\delta^2 + |M((m-1)\Delta k_y, n\Delta k_x) \cdot M(m\Delta k_y, n\Delta k_x)|] \\ G_x(m, n) = [|M(m\Delta k_y, (n-1)\Delta k_x) \cdot M(m\Delta k_y, n\Delta k_x)|]/[\delta^2 + |M(m\Delta k_y, (n-1)\Delta k_x)M(m\Delta k_y, n\Delta k_x)|] \end{cases} \quad (5)$$

式 1 至式 5 中,  $m > 0, n > 0$ .

通过数值模拟验证重构算法的正确性,模拟条件如下:

噪声模型:高斯白噪声;成像距离:40000 km;激光波长:500nm;最小基线间隔:1m;单周期采样点数:128;目标大小 20m;单臂发射器数量:16.

探测目标和无噪声重构图像如图 3.

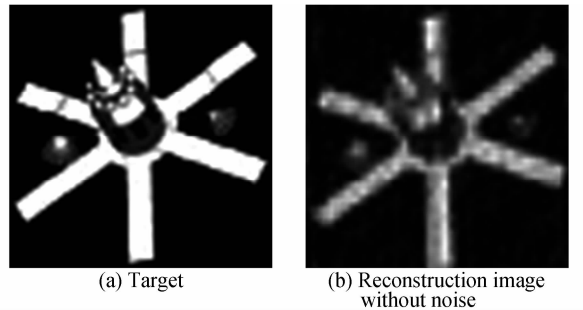


图 3 探测目标和重构图像  
Fig. 3 Detecting target and reconstruction image

为了便于比较,将重构图像由  $33 \times 33$  插值到  $128 \times 128$  个像素点,并迭代 20 次.不同信噪比、不同方法重构图像如表 1.其中直接傅里叶逆变换重构方法记为 DR (Directly Reconstructed).

表 1 不同噪声条件下重构图像

Table 1 Reconstruction images under different SNR and methods conditions using dot-plane type transmitter array

SNR	50	100	150
DR			
LMS			
Wiener			

采用斯特里尔比 (Strehl Ratios, SR) 定量评价成像质量<sup>[17]</sup>.不同情况下重构图像的 SR 如表 2.

表 2 点面发射阵列下 3 种方法重构图像的 SR

Table 2 SR of reconstruction images with point-plane type transmitting

SNR	50	100	150
DR	0.5423	0.7125	0.8217
LMS	0.5423	0.7122	0.8219
Wiener	0.5423	0.7124	0.8219

由表 1 和表 2 可以发现,不论是 LMS 还是 Wiener 滤波方法对噪声的抑制能力都有限,并且采用点面发射阵列时,SNR 需要大于 100 才能清晰分辨目标图像.

### 3 T 型发射阵列重构算法

由于 T 型发射阵列更加适合实际系统,因此对 T 型发射配置模式下重构算法的研究是一项必不可少的工作.

首先对 Wiener 加权噪声重构方法进行研究.当进行  $x$  或者  $y$  轴扫描时,重构算法与点面阵列相同.当对象限进行扫描时,引入“准相位闭合 (Informal Phase Closure, IPC)”这一概念,和相位闭合技术的区别如下:

1) 相位闭合技术使用的目的是去除光束间的粗大相位差异,而 IPC 是为了为使用 LMS 和 Wiener 算法提供三重积数据.

2) 相位闭合技术的后两项参数为两两光束直接抽取的目标频率,包含 Piston 像差,而 IPC 所乘的后两项是目标的单一傅里叶分量值 (不包含 Piston).

将发射光束配置阵列分为不同的情况,如图 4 所示,不同的发射位置对应不同的 IPC 计算方式.

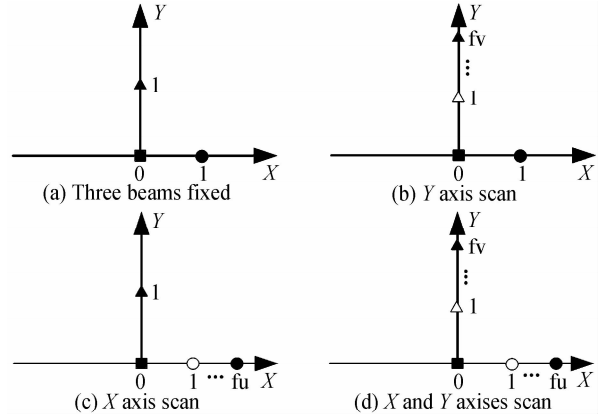


图 4 发射光束基线配置图

Fig. 4 Configuration figure of launch laser beams

当三光束分别位于坐标的  $(0,0)$ 、 $(1,0)$ 、 $(0,1)$ ,如图 4(a) 时

$$IPC_a = Z[M(1,1) \times M^*(0,1) \times M^*(1,0)] \quad (6)$$

当两光束分别位于  $(0,0)$ 、 $(1,0)$ ,另一光束位于  $(0, f_v)$ ,其中  $f_v > 1$ ,如图 4(b) 时

$$IPC_b = Z[M(f_u, f_v) \times M^*(f_u, f_v - 1) \times M^*(0,1)] \quad (7)$$

当两光束分别位于  $(0,0)$ 、 $(0,1)$ ,另一光束位于  $(f_u, 0)$ ,其中  $f_u > 1$ ,如图 4(c) 时

$$IPC_c = Z[M(f_u, f_v) \times M^*(f_u - 1, f_v) \times M^*(1,0)] \quad (8)$$

当三光束分别在  $(0,0)$ 、 $(f_u, 0)$ 、 $(0, f_v)$  位置上时,其中  $f_u > 1$ ,  $f_v > 1$ .如图 4(d) 时

$$IPC_d = Z[M(f_u, f_v) \times M^*(f_u, f_v - 1) \times M^*(0,1)] \quad (9)$$

此时  $M(0,1)$  和  $M(1,0)$  分别为  $y$  轴和  $x$  轴最小基线间隔对应的目标傅里叶分量.

3 光束位置分别为图 4 中的 4 种情况时,噪声加权结果分别为

$$\begin{cases} G_a(1,1) = \frac{|M(\Delta k_y, \Delta k_x)M(0, \Delta k_x)|}{\delta^2 + |M(\Delta k_y, \Delta k_x)M(0, \Delta k_x)|} \\ G_a(n,1) = \frac{|M(n\Delta k_y, \Delta k_x)M((n-1)\Delta k_y, \Delta k_x)|}{\delta^2 + |M(n\Delta k_y, \Delta k_x)M((n-1)\Delta k_y, \Delta k_x)|} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} G_b(n,1) = \frac{|M(n\Delta k_y, \Delta k_x)M((n-1)\Delta k_y, \Delta k_x)|}{\delta^2 + |M(n\Delta k_y, \Delta k_x)M((n-1)\Delta k_y, \Delta k_x)|} \\ G_b(n+1,1) = \frac{|M(n\Delta k_y, \Delta k_x)M((n+1)\Delta k_y, \Delta k_x)|}{\delta^2 + |M(n\Delta k_y, \Delta k_x)M((n+1)\Delta k_y, \Delta k_x)|} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} G_c(1,m) = \frac{|M(\Delta k_y, m\Delta k_x)M(\Delta k_y, (m-1)\Delta k_x)|}{\delta^2 + |M(\Delta k_y, m\Delta k_x)M(\Delta k_y, (m-1)\Delta k_x)|} \\ G_c(2,m) = \frac{|M(\Delta k_y, m\Delta k_x)M(2\Delta k_y, m\Delta k_x)|}{\delta^2 + |M(\Delta k_y, m\Delta k_x)M(2\Delta k_y, m\Delta k_x)|} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} G_d(n,m) = \frac{|M(n\Delta k_y, m\Delta k_x)M(\Delta k_y, m\Delta k_x)|}{\delta^2 + |M(n\Delta k_y, m\Delta k_x)M(\Delta k_y, m\Delta k_x)|} \\ G_d(n+1,m) = \frac{|M((n+1)\Delta k_y, m\Delta k_x)M(n\Delta k_y, m\Delta k_x)|}{\delta^2 + |M((n+1)\Delta k_y, m\Delta k_x)M(n\Delta k_y, m\Delta k_x)|} \end{cases} \quad (13)$$

傅里叶分量估计结果

$$\begin{aligned} O_{R_n}(\Delta k_y, \Delta k_x) &= |M(\Delta k_y, \Delta k_x)| \times \\ &Z[G_a(1,1)IPC_a O_R(0, \Delta k_x) O_R(\Delta k_y, 0) + \\ &G_b(2,1)IPC_b^*(2,1) O_R(2\Delta k_y, \Delta k_x) \cdot \end{aligned}$$

$$O_R^*(0, \Delta k_x)] \quad (14)$$

$$O_{Rb}(m\Delta k_y, \Delta k_x) = |M(m\Delta k_y, \Delta k_x)| \times Z[G_b(m, 1)IPC_b(m, 1)O_R((m-1)\Delta k_y, \Delta k_x)O_R(\Delta k_y, 0) + G_b(m+1, 1) \cdot IPC_b^*(m+1, 1) \times O_R((m+1)\Delta k_y, \Delta k_x)O_R^*(\Delta k_y, 0)] \quad (15)$$

$$O_{Rc}(\Delta k_y, n\Delta k_x) = |M(\Delta k_y, n\Delta k_x)| \times Z[G_c(1, n)IPC_c(1, n)O_R(\Delta k_y, (n-1)\Delta k_x) \cdot O_R(0, \Delta k_x) + G_c(2, n)IPC_c^*(2, n)O_R(2\Delta k_y, n\Delta k_x)O_R^*(\Delta k_y, 0)] \quad (16)$$

$$O_{Rd}(m\Delta k_y, n\Delta k_x) = |M(m\Delta k_y, n\Delta k_x)| \times Z[G_d(m, n)IPC_d(m, n)O_R((m-1)\Delta k_y, n\Delta k_x)O_R(\Delta k_y, 0) + G_d(m+1, n) \cdot IPC_d^*(m+1, n) \times O_R((m+1)\Delta k_y, n\Delta k_x)O_R^*(\Delta k_y, 0)] \quad (17)$$

式 10 至式 17 中  $m > 1, n > 1$ .

相比 Wiener 滤波,最小二乘重构算法相对简单,依然参考图 4 的发射配置方案,准相位闭合 IPC 计算方式与 Wiener 滤波方法相同.

傅里叶分量计算结果为

$$O_{Ra}(\Delta k_y, \Delta k_x) = [G_a(1, 1)IPC_a O_R(0, \Delta k_x) \cdot O_R(\Delta k_y, 0) + G_b(2, 1)FPC_b^*(2, 1)O_R(2\Delta k_y, \Delta k_x)O_R^*(0, \Delta k_x)]/2 \quad (18)$$

$$O_{Rb}(m\Delta k_y, \Delta k_x) = [G_b(m, 1)IPC_b(m, 1) \cdot O_R((m-1)\Delta k_y, \Delta k_x)O_R(\Delta k_y, 0) + G_b(m+1, 1)IPC_b^*(m+1, 1)O_R((m+1)\Delta k_y, \Delta k_x)O_R^*(\Delta k_y, 0)]/2 \quad (19)$$

$$O_{Rc}(\Delta k_y, n\Delta k_x) = [G_c(1, n)IPC_c(1, n) \cdot O_R(\Delta k_y, (n-1)\Delta k_x)O_R(0, \Delta k_x) + G_c(2, n)IPC_c^*(2, n)O_R(2\Delta k_y, n\Delta k_x) \cdot O_R^*(\Delta k_y, 0)]/2 \quad (20)$$

$$O_{Rd}(m\Delta k_y, n\Delta k_x) = [G_d(m, n)IPC_d(m, n) \cdot O_R((m-1)\Delta k_y, n\Delta k_x)O_R(\Delta k_y, 0) + G_d(m+1, n)IPC_d^*(m+1, n)O_R((m+1)\Delta k_y, n\Delta k_x)O_R^*(\Delta k_y, 0)]/2 \quad (21)$$

上述式中依然要求  $m > 1, n > 1$ .数值模拟条件和表 1 中的相同,重构图像如表 3.

表 3 T 型不同条件下重构图像

Table 3 Reconstruction images under different SNR and methods conditions using T type transmitter array

SNR	50	50	100	100	150	150
DR						
LMS						
Wiener						

由表 3 可以发现,当 SNR=50 时,采用 LMS 重构的图像质量较直接重构方法得到大幅度提升,背景噪声更小,能清晰区分背景和图像,卫星的太阳能帆板重构效果更好,更为平直;采用 Wiener 滤波算法时,虽然卫星最上面的太阳能帆板重构质量得到进一步提升,但是左下角靠近卫星主体的太阳能帆板略显缺失.为了凸显差别,对卫星左上角椭圆形标记区域进行放大处理,如表 3 第 3 行.当 SNR=100 时,LMS 方法修正了卫星最下端的太阳能帆板,使其更为平直;Wiener 方法不仅修正了太阳能帆板,更使得最上端太阳能帆板的间断结构显现出来.当 SNR=150 时,采用 LMS 和 Wiener 方法卫星顶端的太阳能帆板的间断可清晰分辨.

采用 T 型发射阵列,SNR $\geq$ 50 时重构质量较好.

对比点面和 T 型发射阵列重构图像,当 SNR $\leq$ 100 时,T 型成像质量远远优于点面发射重构图像.T 型发射阵列优于点面发射阵列的原因分析如下:无噪声时  $x$  轴抽取的目标单一傅里叶分量迭代公式为

$$\left\{ \begin{array}{l} O(\Delta k_x) = R(\Delta k_x) \\ O(2\Delta k_x) = R(2\Delta k_x)R(\Delta k_x) = O(f_{20x}, 0)/ \\ \quad O(f_{21x}, 0)/O(f_{10x}, 0) = O(f_{20x}, 0)/O^2(f_{10x}, 0) \\ O(3\Delta k_x) = R(3\Delta k_x)R(2\Delta k_x)R(\Delta k_x) = \\ \quad O(f_{30x}, 0)/O^3(f_{10x}, 0) \\ \dots \\ O(m\Delta k_x) = R(m\Delta k_x)\dots R(2\Delta k_x)R(\Delta k_x) = \\ \quad O(f_{m0x}, 0)/O^m(f_{10x}, 0) \end{array} \right. \quad (22)$$

式中  $R(m\Delta k_x)$  为第  $m$  个三重积,  $O(f_{m0x}, 0)$  为  $x$  轴上第  $m$  个单一傅里叶分量.

点面发射阵列为了得到目标单一傅里叶分量,需进行迭代计算,象限迭代公式为

$$O_e(m\Delta k_y + n\Delta k_x) \equiv O(m\Delta k_y + n\Delta k_x) / (O^m(\Delta k_y) \cdot O^n(\Delta k_x)) = R(m\Delta k_y + n\Delta k_x) R[(m-1)\Delta k_y + n\Delta k_x] \cdots R(2\Delta k_y + n\Delta k_x) R(\Delta k_y + n\Delta k_x) R(n\Delta k_x) \cdot R[(n-1)\Delta k_x] \cdots R(2\Delta k_x) R(\Delta k_x) \quad (23)$$

当采用 T 型发射模式时,象限中单一傅里叶分量的获取方法为<sup>[18]</sup>

$$O_e(m\Delta k_x + n\Delta k_y) = R(m\Delta k_x + n\Delta k_y) \times O(0, f_{m0y}) \times O(f_{m0x}, 0) \quad (24)$$

可见 T 型发射模式单一傅里叶分量获取时并不需要连乘迭代,并且每个频率分量由于轴向扫描引入的噪声含量相同,这也是采用 T 型发射阵列的一大优势.

3 种方法重构图像的 SR 如表 4.

表 4 T 型发射阵列下 3 种方法重构图像的 SR

Table 4 SR of reconstruction images with T type transmitting

SNR	50	100	150
DR	0.7154	0.8180	0.8355
LMS	0.7685	0.8198	0.8473
Wiener	0.7742	0.8204	0.8643

T 型发射阵列相比点面发射阵列重构图像的 SR 增加值如表 5.

表 5 T 型发射阵列下 SR 的提升值

Table 5 Increased SR of reconstruction images with T type transmitting

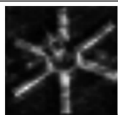
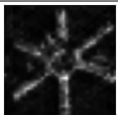
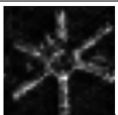
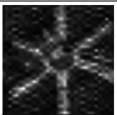
SNR	50	100	150
DR	0.1731	0.1055	0.0138
LMS	0.2262	0.1067	0.0254
Wiener	0.2319	0.1080	0.0424

由表 4 可见,当 SNR=50 时,LMS 和 Wiener 重构算法的 SR 相比直接傅里叶逆变换方法分别提高了 0.05 和 0.06,提高百分比为 7% 和 8.4%,证明了 T 型发射模式重构算法的可行性和正确性.同时表 5 客观上证实了在底信噪比条件下,T 型发射阵列优于点面发射阵列模式.

虽然 Wiener 滤波方法重构图像质量更好,但要较好地估计噪声方差,当 SNR 为 50 时,不同信噪比偏差量 (ESNR: error SNR) 对应的重构图像 (Reconstruction Image, RI) 及 SR 如表 6. 当 SNR 估计偏差为 1 时,重构图像不论是从视觉上还是 SR 上都已经下降了,可见 Wiener 重构算法对噪声估计的依赖性较强.而在现实系统中较难精确估计返回信号的 SNR,进而也不易确定噪声方差,因此本文推荐采用 LMS 方法重构图像.

表 6 噪声估计方差偏差对 Wiener 重构成像的影响

Table 6 The effect of error of noise variance on Wiener reconstruction image quality

ESNR	0	1	3	5
RI				
SR	0.7685	0.7363	0.7360	0.5566

## 4 结论

傅里叶望远镜对深空目标成像探测拥有独特的优势,成为非传统光学成像研究的热点技术之一,为了建立工程系统,需要对各项关键技术进行预先研究.本文结合项目需求,开展了 T 型发射模式的图像重构算法,得出了以下结论:

1) 数值模拟发现 T 型发射模式避免了噪声积累,相同成像信噪比条件下,重构图像质量远优于点面发射模式.

2) 首次提出了“准相位闭合”概念,完成了 T 型发射模式的重构算法,提高了重构图像的斯特里尔比,当 SNR=50 时,LMS 和 Wiener 算法分别提高了 0.05 和 0.06.

### 参考文献

- [1] JIA Jian-lu, WANG Jian-li, ZHAO Jin-yu, *et al.* 961-element adaptive optical wave-front processor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(6): 1387-1393.  
贾建禄, 王建立, 赵金宇, 等. 961 单元自适应光学系统波前处理器[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(6): 1387-1393.
- [2] JIA Jian-lu, WANG Jian-li, ZHAO Jin-yu, *et al.* Optimization of adaptive optical wave-front algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(4): 1026-1031.  
贾建禄, 王建立, 赵金宇, 等. 自适应光学系统波前处理算法的优化[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(4): 1026-1031.
- [3] LIN Xu-dong, LIU Xin-yue, WANG Jian-li, *et al.* Performance test and experiment of correction capability of 137-element deformable mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(2): 267-273.  
林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 137 单元变形镜性能测试及校正能力实验[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(2): 267-273.
- [4] HOLMES R, A S, BHOWMIK A, *et al.* Analysis and simulation of a synthetic-aperture technique for imaging through a turbulent medium[J]. *Optical Society of America*, 1996, **13**(2): 351-364.
- [5] BELENKII M, HUGHES K, BRINKLEY T, *et al.* Residual turbulent scintillation effect and impact of turbulence on the fourier telescope system[C]. SPIE, 2004, **5160**:56-67.
- [6] OLSON D F, LONG S M, ULIBARRI L J. Comparison of complex exponential and least squares wavefront reconstructor for regular square and non-square grid arrays [C]. SPIE, 2000, **4091**:323-332.
- [7] MACDONALD K R, BOGER J K, FETROWB M, *et al.* An experimental demonstration of Fourier telescope [C]. SPIE, 1999, **3815**:23-29.

- [8] CUELLAR E L, STAPP J, COOPER J. Laboratory and field experimental demonstration of a fourier telescope imaging system[C]. SPIE, 2005, **5896**: 58960D-1-15.
- [9] MATHIS J, STAPP J, CUELLAR E L. Field Experiment performance of the receiver elements for a fourier telescope imaging system[C]. SPIE, 2005, **5896**: 58960F-1-12.
- [10] CHEN Wei, LI Quan, WANG Yan-gui. Object reconstruction of fouriertelescopy based on allphase spectrum analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3443-3446.  
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):3443-3446.
- [11] YU Shu-hai, WANG Jian-li, DONG Lei, *et al.* Numerical simulation of fourier telescopey based on non-uniform smapling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(8):0811001.  
于树海, 王建立, 董磊, 等. 非均匀采样的傅里叶望远镜数值模拟研究[J]. 光学学报, 2013, **33**(8):0811001.
- [12] ZHANG Yu, LUO Xiu-juan, XIA Ai-li, *et al.* Image quality evaluation and analysis in fourier telescopey for laboratory demonstration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(3): 0311001.  
张羽, 罗秀娟, 夏爱利, 等. 傅里叶望远镜成像质量分析与评价[J]. 光子学报, 2014, **43**(3):0311001.
- [13] CHEN Wei, LI Quan, WANG Yan-gui. Experimental research of fourier telescopey imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3):0311001;1-6.  
陈卫, 黎全, 王雁桂. 傅里叶望远镜成像系统的实验研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(3),0311001;1-6.
- [14] DONG Lei, LIU Xin-yue, LIN Xu-dong, *et al.* Improvement of performance and analysis of resultsof field experiments of fourier telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0201004.  
董磊, 刘欣悦, 林旭东, 等. 傅里叶望远镜外场实验性能改进和结果分析[J]. 光学学报, 2012, **32**(2):0201004.
- [15] ZENG Zhi-hong, LUO Xiu-juan, WANG Bao-feng, *et al.* Laboratory simulation of atmosphere turbulence for fourier telescopey[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6):601002.  
曾志红, 罗秀娟, 王保锋, 等. 傅里叶望远镜大气湍流模拟实验研究[J]. 光子学报, 2014, **43**(6):601002.
- [16] 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.
- [17] YU Shu-hai, WANG Jian-li, DONG Lei, *et al.* Estimation of missing fourier components of fourier telescopey based on least square fitting[J]. *Optics and precision Engineering*, 2015, **23**(1):276-281.  
于树海, 王建立, 董磊, 等. 基于最小二乘法拟合估计缺失分量的傅里叶望远镜[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(1):276-281.
- [18] ZHANG Yan, YANG Chun-ping, GUO Jing, *et al.* Spectrum extraction mode for Fourier telescopey 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镜术频谱抽取方式[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(3):571-576.