

傅里叶望远镜重构图像虚像分析

于树海 董磊 刘欣悦 凌剑勇

Analysis on reconstruction of virtual images of Fourier telescoping

Yu Shu-Hai Dong Lei Liu Xin-Yue Ling Jian-Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 184205 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.184205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I18>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

集成光波导静态傅里叶变换微光谱仪分辨率倍增方法

End-face reflected LiNbO<sub>3</sub> waveguide based stationary miniature Fourier transform spectrometer with two-fold enhanced spectral resolution

物理学报.2015, 64(11): 114207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114207>

基于 Hilbert 变换实现数字全息高精度相位重建

High accuracy phase reconstruction of digital hologram by Hilbert transform

物理学报.2014, 63(19): 194207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194207>

利用小尺寸电荷耦合器件实现数字全息高分辨成像

High-resolution digital holographic microscopy realized by small size CCD camera

物理学报.2013, 62(24): 244203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.244203>

基于同态信号处理的数字全息广义线性重建算法研究

Generalized linear reconstructing algorithm based on homomorphic signal processed in digital holographic microscopy

物理学报.2013, 62(23): 234207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.234207>

高质量等曲率物参光像面数字全息显微系统

High-quality digital image-plane micro-holographic system with the same wavefront curvature of reference and object wave

物理学报.2013, 62(2): 024207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024207>

## 傅里叶望远镜重构图像虚像分析

于树海<sup>†</sup> 董磊 刘欣悦 凌剑勇

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2015年3月6日收到; 2015年5月7日收到修改稿)

研究了采用T型激光发射阵列情况下傅里叶望远镜重构图像的虚像问题, 基于系统成像基本原理, 明确了虚像的来源. 分析认为, 发射光束在 $x$ 和 $y$ 轴扫描时, 在俯仰角误差的作用下, 抽取目标的空间频率和设定值之间存在一定的偏差; 当进行轴向和象限相位闭合、计算目标的单一傅里叶分量时, 该偏差会对频谱的频移造成随机的相位影响, 反映在空域上使得重构图像存在虚影现象. 在不同扫描方式情况下, 采用下一步外场实验参数, 通过计算机模拟证实了上述分析的正确性.

**关键词:** 傅里叶望远镜, 空间频率偏差, 图像重构**PACS:** 42.25.Kb, 42.30.Kq, 06.30.Ft, 42.30.-d**DOI:** 10.7498/aps.64.184205

## 1 引言

随着人们空间活动和轨道卫星数量的增加, 对空间目标高分辨率成像探测技术的研究成为一项必要工作. 除了采用地基大口径望远镜外, 研究人员提出了一些非常规光学成像技术, 傅里叶望远镜(Fourier telescope, FT)成像系统结合了激光主动照明和合成孔径的技术优势, 可对深空暗、弱、小目标高分辨率成像.

FT成像系统自1994年由Holmes等<sup>[1]</sup>在空间成像技术大会上提出后, 在1995年建立了激光发射系统数学模型并引入了相位闭合概念<sup>[2]</sup>. 文献<sup>[3]</sup>完成了实验室内成像验证工作, 对不同尺寸的目标分别进行了 $9 \times 9$ ,  $17 \times 17$ 和 $33 \times 33$ 傅里叶分量数的抽取, 最终重构了目标图像, 证实了FT的可行性. 文献<sup>[4]</sup>研究了最小二乘法、Weiner滤波方法和Clean方法处理返回信号, 并采用Strehl比定量评价重构图像质量, 完善了FT系统. Mathis等<sup>[5]</sup>和Cuellar等<sup>[6]</sup>研究了下行链路往返1.5 km对FT成像系统的影响, 并从发射器、接收定日镜、次镜和PMT等方面详尽介绍了外场实验系统, 实验证明FT对下行链路大气扰动并不敏感. 随着研究的深

入, 分别提出了对同步静止轨道卫星同时发射3束相干激光的GLINT<sup>[7]</sup>和对低轨道运动目标同时发射多光束的SAINT<sup>[8]</sup>计划.

于树海等<sup>[9]</sup>首次将非均匀采样技术引入到FT成像领域, 结合幅值衰减法模拟证实了其可行性, 降低了回波信号的采样频率, 特别适合多光束发射系统; 采用全相位谱分析技术对外场实验数据进行了处理, 克服了时域频域偏差对系统的影响<sup>[10]</sup>; 采用最小二乘法估计缺失傅里叶分量, 完善了非均匀发射系统<sup>[11]</sup>.

张文喜等<sup>[12]</sup>基于光学传递函数相关理论, 研究了T型、O型两种激光发射阵列布局的FT成像系统的分辨率之间的关系, 发现T型发射布局的角分辨率优于O型. 司庆丹等<sup>[13]</sup>研究发现, FT成像系统的返回信号包含待测对象曲面的梯度信息, 导致恢复的图像存在误差, 该发现在实际工程系统中至关重要. 陈卫等<sup>[14]</sup>对一维和二维目标进行了实验室内成像实验, 并且实验方案较好地模拟了外场T型发射阵列模式.

由于FT采用的光束发射口径较小, 因此上行链路4阶以上的高阶大气扰动对成像系统的影响可以忽略不计, 降低了采用自适应光学校正的成本和

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: yushuhai\_0707@sina.com

复杂度<sup>[15-17]</sup>. 但上述分析基本都是基于光束俯仰角不存在偏差的情况下进行的, 而实际系统必然受到偏差的影响, 在俯仰角误差(大气倾斜像差和指向系统偏差)的作用下, 计算机仿真发现重构图像出现虚像的现象, 不仅降低了成像质量, 有时甚至难以分辨目标, 使得成像系统失去价值. 而现有公开资料中未见对重构图像产生虚像的理论分析的研究. 本文从基本原理出发, 依托拟建立的光束上下行往返 600 m 外场实验参数, 分析了虚像来源并进行了计算机模拟验证, 为外场实验及工程系统实施提供了技术指导.

## 2 傅里叶分量抽取原理

不存在俯仰角误差时: 发射基线的  $x$  轴上的 3 束干涉激光照明目标后, 解调回波时域信号, 所得的 3 个频域信号<sup>[2]</sup>可表示为

$$\begin{cases} M(k_1) = M_{1,0} \\ = NTI_0 O(f_{10x}, 0) e^{i(\Delta\omega t + \phi_1 - \phi_0)}, \\ M(k_2) = M_{m,1} \\ = NTI_0 O(f_{m1x}, 0) e^{i(2\Delta\omega t + \phi_m - \phi_1)}, \\ M(k_3) = M_{m,0} \\ = NTI_0 O(f_{m0x}, 0) e^{i(3\Delta\omega t + \phi_m - \phi_0)}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 0, 1,  $m$  分别代表固定、剪切和扫描 3 束激光;  $NTI_0$  为常数项, 可以不予考虑;  $\Delta\omega$  为光束间人为地引入的最小频差,  $\phi_m$  为光束  $m$  的 Piston 像差,  $O(f_{m0x}, 0)$  为光束  $m$  和 0 形成的干涉条纹所抽取的目标傅里叶分量(空间频率). 为了消除 Piston 像差引入的粗大相位差异, 需要计算(1)式的比值, 即采用相位闭合技术, 得到一个三重积  $R(k_m)$ :

$$\begin{aligned} R(k_m) &= \frac{M_{m,0}}{M_{m,1}M_{1,0}} \\ &= \frac{O(f_{m0x}, 0)}{NTI_0 O(f_{m1x}, 0) O(f_{10x}, 0)}. \end{aligned} \quad (2)$$

可见除常数项外, (2)式中仅是目标不同空间频率的比值. 为了获得目标的单一傅里叶分量信息, 必须完成一系列测量, 最终得到目标的单一空间频率记为  $O(m\Delta k)$ , 其中  $\Delta k$  表示发射器最小基线间隔所确定的空间频率,  $m$  表示测得的第  $m$  个傅里叶分量( $m$  倍最小基线间隔对应的空间频率).

由于采用的是均匀间隔发射模式, 当不存在俯仰角误差时, 可以认为

$$O(f_{21x}, 0) = O(f_{10x}, 0). \quad (3)$$

忽略常数项  $NTI_0$ , 整理得到目标单一傅里叶分量  $O(m\Delta k)$ :

$$\begin{cases} O(\Delta k) = R(k_1) = 1, \\ O(2\Delta k) = R(k_2)R(k_1) \\ = O(f_{20x}, 0)/O(f_{21x}, 0)/O(f_{10x}, 0) \\ = O(f_{20x}, 0)/O^2(f_{10x}, 0), \\ O(3\Delta k) = R(k_3)R(k_2)R(k_1) \\ = O(f_{30x}, 0)/O^3(f_{10x}, 0), \\ \vdots \\ O(m\Delta k) = R(k_m)R(k_2)R(k_1) \\ = O(f_{m0x}, 0)/O^m(f_{10x}, 0). \end{cases} \quad (4)$$

$y$  轴的傅里叶分量抽取方式和  $x$  轴相似, 不再单独分析. 采用 T 型发射阵列时, 象限相位闭合形式<sup>[18]</sup>如下:

$$\begin{aligned} Rq(k_{-m,n}) &= \frac{M_{-m,n}}{M_{0,-m}M_{n,0}} \\ &= \frac{O(f_{-mnx}, f_{mny})}{O(0, f_{n0y})O(f_{-m0x}, 0)}. \end{aligned} \quad (5)$$

在已知  $x, y$  轴上的单一傅里叶分量信息的情况下, 不需要连乘迭代即可计算象限对应的傅里叶分量值为

$$\begin{aligned} O(f_{mnx}, f_{mny}) &= Rq(k_{m,n})O(0, f_{n0y})O(f_{m0x}, 0) \\ &- M \leq m \leq M \quad (m \neq 0, 1 \leq n \leq N), \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $M, N$  分别为  $x, y$  轴上放置的发射望远镜最大数量.

通过上面的分析发现, 得到的傅里叶分量除了目标的真实信息  $O(f_{mnx}, f_{mny})$  外, 还包含  $O^m(f_{10x}, 0)$  和  $O^n(f_{10y}, 0)$  两项, 将这两项称为附加项.

## 3 重构图像虚像分析

当发射 3 光束存在俯仰角误差时, 不仅(3)式不成立, 而且每个三重积中  $O'(f_{10x}, 0)$  随着发射光束位置的改变而改变, 但  $O(f_{21x}, 0)$  和  $O'(f_{10x}, 0)$  的改变均可以写成  $O(f_{10x}, 0)$  的倍数形式, 如下:

$$O(f_{21x}, 0) = p_1 O(f_{10x}, 0), \quad (7)$$

$$O'(f_{10x}, 0) = q_1 O(f_{10x}, 0). \quad (8)$$

(4)式可改写为:

$$\left\{ \begin{array}{l} O(\Delta k) = R(k_1) = 1, \\ O(2\Delta k) = R(k_2)R(k_1) \\ = O(f_{20x}, 0)/O^2(f_{10x}, 0)/p_1/q_1, \\ O(3\Delta k) = R(k_3)R(k_2)R(k_1) \\ = O(f_{30x}, 0)/O^3(f_{10x}, 0)/p_2/q_2, \\ \vdots \\ O(m\Delta k) = R(k_m)R(k_2)R(k_1) \\ = O(f_{m0x}, 0)/O^m(f_{10x}, 0)/p_m/q_m. \end{array} \right. \quad (9)$$

令  $p_m/q_m = P_m$ ,  $Mod_{m0x} = |O^m(f_{m0x}, 0)/P_m|$ , 表示取模, 可见  $Mod_{m0x}$  仅仅改变了对应傅里叶分量的幅值, 可以不予考虑.

令  $Ph_{m0x} = \arg(O^m(f_{m0x}, 0)/P_m) = e^{i\Delta\phi_{10m}/P_m}$  表示取相位操作.

对于激光束等间隔发射模式, 令两光束间最小间隔  $\Delta x = s$ , 抽取的目标最小空间频率为  $f_{sx} = s/\lambda R$ ,  $\lambda$  为激光波长,  $R$  为成像距离. 对附加项  $Ph_{m0x}$  进行傅里叶逆变换, 得到空域信息  $T$ :

$$\begin{aligned} & FT^{-1}[Ph_{m0x}] \\ & = FT^{-1}\left[e^{i2\pi\left(\frac{f_x \Delta\phi_{10x} m/P_m}{2\pi m f_{sx}}\right)}\right] \\ & = T\left(x + \frac{\Delta\phi_{10x}/P_m}{2\pi f_{sx}}, 0\right), \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $f_x = m f_{sx}$ , 表示抽取的第  $m$  个空间频率. 根据采样定理, 傅里叶望远镜成像系统分辨目标的最大尺度和最小空间频率需满足下式:

$$d_{\text{object}} = \frac{\lambda R}{s} = \frac{1}{f_{sx}}. \quad (11)$$

重构图像  $x$  轴上的像素分辨率  $p_x$  为

$$p_x = \frac{d_{\text{object}}}{2M+1}. \quad (12)$$

可重写 (10) 式如下:

$$\begin{aligned} & FT^{-1}[Ph_{m0x}, 0] \\ & = T\left(x + \frac{\Delta\phi_{10x}}{2\pi} d_{\text{object}}/P_m, 0\right). \end{aligned} \quad (13)$$

0, 1 光束在  $x$  轴上的相位偏差为  $\Delta\phi_{10x} = [0, 2\pi]$  的任意值, 且在成像过程中固定不变. 通过 (13) 式可以发现, 俯仰角误差最终使重构图像在  $x$  轴上的空间位移引入了随机误差项  $P_m$ .

同理, 三光束位于  $y$  上时有:

$$\begin{aligned} & FT^{-1}[0, Ph_{n0y}] \\ & = T\left(0, y + \frac{\Delta\phi_{10y}}{2\pi} d_{\text{object}}/G_n\right), \end{aligned} \quad (14)$$

式中  $g_n/h_n = G_n$ ;  $\Delta\phi_{10y} = [0, 2\pi]$  为 0, 1 光束在  $y$  轴上的相位偏差. 同样地, 俯仰角误差最终使重构图像在  $y$  轴上的空间位移引入了随机误差项  $G_n$ .

T 型发射阵列模式抽取象限傅里叶分量时, 附加项带来的影响如下式:

$$\begin{aligned} & FT^{-1}[Ph_{m0x}, Ph_{n0y}] \\ & = T\left(x + \frac{\Delta\phi_{10x}}{2\pi} \frac{d_{\text{object}}}{P_m}, y + \frac{\Delta\phi_{10y}}{2\pi} \frac{d_{\text{object}}}{G_n}\right). \end{aligned} \quad (15)$$

对比可见, 当不存在俯仰角误差时, 抽取的目标傅里叶分量转化到空域坐标后 都满足固定的像素偏差  $\left(\frac{\Delta\phi_{10x}}{2\pi} d_{\text{object}}, \frac{\Delta\phi_{10y}}{2\pi} d_{\text{object}}\right)$ , 只要进行简单的图像延拓就可以反映出整个目标图像. 但在误差的作用下, 不同的傅里叶分量重构时平移存在随机性, 反映到重构图像方面: 当误差较小时, 重构图像会出现云团噪声; 当误差较大时, 由于某个傅里叶分量的跳变, 就会出现虚像, 如当  $x$  轴上的第 6 个发射光束存在误差较大时,  $P_6 = M+1$ , 其他的发射位置  $P_m = 1$ . 下面进行计算机模拟验证分析.

## 4 计算机模拟分析

本文研究是基于外场验证上下行链路大气扰动对傅里叶望远镜成像质量的影响分析的基础上, 模拟参数严格采用外场实验技术要求.

激光波长  $\lambda$  为 532 nm, 上行光束传输距离  $R$  为 300 m, T 型发射阵列单臂放置 16 个发射望远镜, 发射望远镜口径 1 cm, 最小基线间隔 4 cm, 发射光束采用高斯光束模型, 束腰 2 mm, 目标采样点数  $32 \times 32$ , 目标尺度 2.7 mm. 为了判断俯仰角误差对成像的影响, 这里模拟不考虑信号噪声问题. 图 1 所示为模拟目标和光束扫描方式及理想重构图像.

图 1 (b) 中  $x$  轴上的圆形光束代表  $x$  轴扫描光束;  $y$  轴上的三角形光束代表  $y$  轴扫描光束; 坐标系原点处方形光束代表固定光束, 在整个成像过程中固定不动. 初始状态下三光束分别位于坐标系的 (0, 1), (1, 0), (0, 0) 三点. 扫描时  $y$  轴扫描光束首先沿着  $y$  轴从 (0, 1) 点位置以最小基线间隔为步长逐渐运动到 (0, 16) 点位置, 此时  $x$  轴扫描光束沿着  $x$  轴运动一个最小基线间隔,  $y$  轴扫描光束再从 (0, 16) 点位置回到 (0, 1) 点位置, 往返重复上述运动方



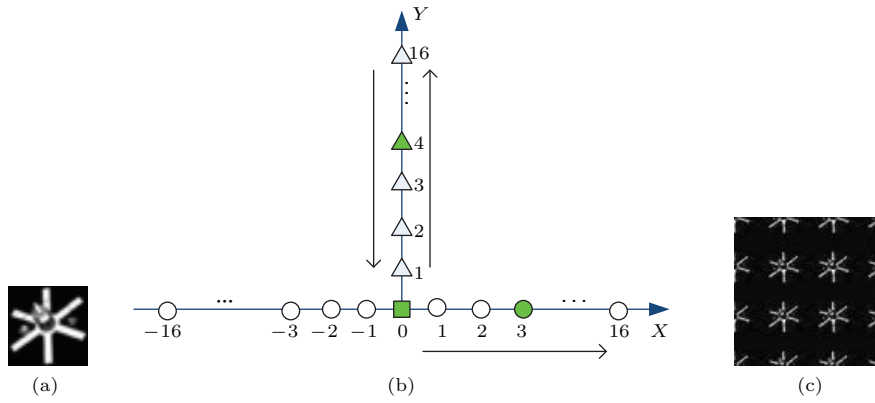


图1 (a) 成像目标; (b) 光束发射阵列模式; (c) 无俯仰误差理想重构图像

Fig. 1. (a) Imaging target; (b) mode of beam transmitting array; (c) reconstruction image without pitch error

式, 直到  $x$  扫描光束运动到  $(16, 0)$  点位置, 完成第一象限目标空间频率的抽取工作. 当  $x$  轴光束沿着负半轴扫描时, 完成第二象限空间频率抽取工作, 最后即可重构目标图像.

通过 (6) 式可以发现, T型发射阵列图像重构对轴向傅里叶分量具有依赖性, 因此轴向扫描时, 俯仰角误差的允许范围势必低于象限扫描. 同样在随机最大误差  $30 \mu\text{rad}$  时, 不同情况下重构图像如图 2 所示.

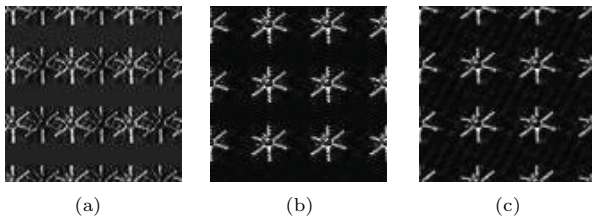


图2 (a)  $x$  轴俯仰角误差; (b)  $y$  轴俯仰角偏差; (c) 象限俯仰角误差

Fig. 2. (a)  $x$  axis with pitch error; (b)  $y$  axis with pitch error; (c) quadrant with pitch error.

由图 2(a) 和图 2(b) 可见,  $x$  轴俯仰角误差对成像系统的影响远远高于  $y$  轴, 这和发射阵列的扫描方式有关. 上述重构结果采用的扫描方式为  $y$  轴重复多次扫描, 还可以采用相似的发射模拟, 采用  $x$  轴重复多次扫描, 如图 3(a) 所示, 模拟发现相同条件下重构图像如图 3(b) 和图 3(c).

可见, 采用上述两种发射配置模式, 重构图像虚像问题基本相同(在  $x$  轴存在俯仰角误差时, 出现虚像), 分析认为, 不论是采用图 1(b) 还是图 3(a) 的发射模式,  $x$  轴扫描光束都进行了整个坐标轴的扫描, 即  $(-16, 0)$  至  $(-1, 0)$  和  $(1, 0)$  至  $(16, 0)$ , 而  $y$  轴发射望远镜仅仅做  $(0, 1)$  至  $(0, 16)$  的扫描工作, 抽取了目标的第 1 和第 2 象限空间频率. 改变发射模式, 使得  $y$  轴扫描  $(-16, 0)$  至  $(-1, 0)$  和  $(1, 0)$  至  $(16, 0)$ , 而  $x$  轴发射望远镜仅扫描  $(0, 1)$  至  $(0, 16)$ , 抽取目标的第 1 和第 4 象限空间频率. (6) 式中  $m$  和  $n$  的范围做了相应的改变, 如下式:

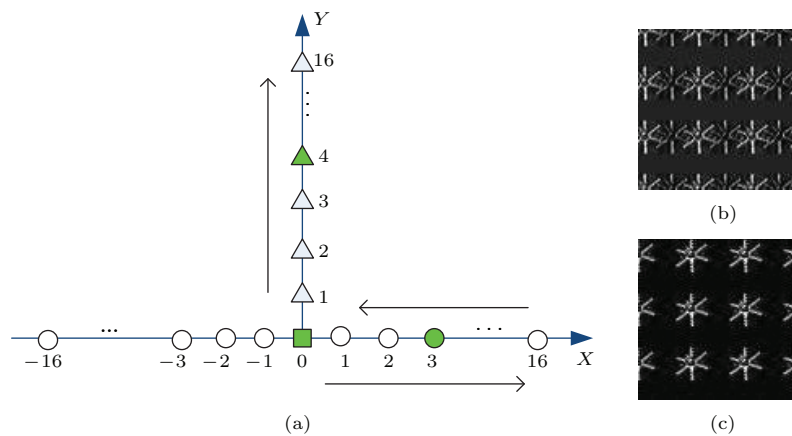


图3 (a)  $x$  轴重复扫描; (b)  $x$  轴俯仰角误差; (c)  $y$  轴俯仰角偏差

Fig. 3. (a)  $x$  axis repeat scan; (b)  $x$  axis with pitch error; (c)  $y$  axis with pitch error.

$$O(f_{mnx}, f_{mny}) = Rq(k_{m,n})O(0, f_{n0y})O(f_{m0x}, 0) - N \leq n \leq N \quad (n \neq 0, 1 \leq m \leq M). \quad (16)$$

在相同的模拟条件下, 重构图像如图 4.

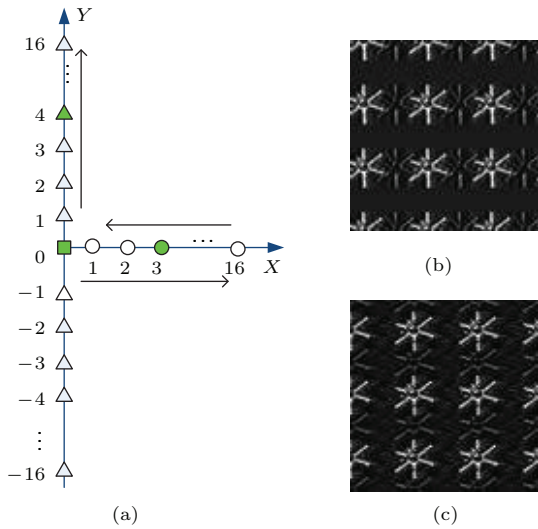


图 4 (a) 发射器配置方案; (b)  $x$  轴俯仰角误差; (c)  $y$  轴俯仰角偏差  
Fig. 4. (a) Transmitter configuration method; (b)  $x$  axis with pitch error; (c)  $y$  axis with pitch error.

综上所述发现: 不论是采用怎样的扫描方式, 当  $x$  轴或者  $y$  轴发射光束存在俯仰角误差较大时, 重构图像在  $x$  轴或  $y$  轴向都会出现虚像.

## 5 总 结

在傅里叶望远镜成像技术基本原理的基础上, 采用 T 型发射阵列分析了重构图像虚像的来源, 通过数学推导认为轴向扫描时发射望远镜指向偏差所引入的相位偏差是造成重构图像虚像的主要原因. 按照下一步外场实验参数对成像系统进行了数值模拟, 证实了推断的正确性. 模拟发现, 傅里叶望远镜成像系统在进行轴向扫描时要求的指向精度要高于象限扫描时. 本文研究为精细的系统设计提供了参考.

## 参考文献

- [1] Holmes R, MacGovern A, Bhowmik A 1994 *Proceedings of the 1994 Space Surveillance Workshop* p135
- [2] Holmes R B, Ma S, Bhowmik A, Greninger C 1995 *SPIE* **2566** 177
- [3] MacDonalda K R, Boger J K, Fetrow M, Long S 1999 *SPIE* **3815** 23
- [4] Holmes R B, Brinkley T 1999 *SPIE* **3815** 11
- [5] Mathis J, Stapp J, Louis E L, Cooper J, Morris A, Fairchild P, Hult D, Koski K, Ramzel L, Thornton M A 2005 *SPIE* **5896** 58960F
- [6] Cuellar E L, Stapp J, Cooper J 2005 *SPIE* **5896** 58960D
- [7] Ford S D, Voelz D G, Gamiz V L, Storm S L, Czyzak S R 1999 *SPIE* **3815** 2
- [8] Spivey B, Stapp J, Sandler D 2006 *SPIE* **6307** 630702
- [9] Yu S H, Wang J L, Dong L, Liu X Y, Wang G C 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0811001 (in Chinese) [于树海, 王建立, 董磊, 刘欣悦, 王国聪 2013 光学学报 **33** 0811001]
- [10] Yu S H, Wang J L, Dong L, Liu X Y 2012 *Opt. Precision Eng.* **20** 2275 (in Chinese) [于树海, 王建立, 董磊, 刘欣悦 2012 光学精密工程 **20** 2275]
- [11] Yu S H, Wang J L, Dong L, Liu X Y, Wang L 2015 *Opt. Precision Eng.* **23** 282 (in Chinese) [于树海, 王建立, 董磊, 刘欣悦, 王亮 2015 光学精密工程 **23** 282]
- [12] Zhang W X, Xiang L B, Kong X X, Li Y, Wu Z, Zhou Z S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164203 (in Chinese) [张文喜, 相里斌, 孔新新, 李扬, 伍洲, 周志盛 2013 物理学报 **62** 164203]
- [13] Si Q D, Luo X J, Zeng Z H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104203 (in Chinese) [司庆丹, 罗秀娟, 曾志红 2014 物理学报 **63** 104203]
- [14] Chen W, Li Q, Wang Y G 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0311001 (in Chinese) [陈卫, 黎全, 王雁桂 2011 光学学报 **31** 0311001]
- [15] Jia J L, Wang J L, Zhao J Y, Liu X Y, Li H W, Wang L, Lin X D, Zhao Y F 2013 *Opt. Precision Eng.* **21** 1387 (in Chinese) [贾建禄, 王建立, 赵金字, 刘欣悦, 李洪文, 王亮, 林旭东, 赵雨菲 2013 光学精密工程 **21** 1387]
- [16] Jia J L, Wang J L, Zhao J Y, Wang G Q 2013 *Opt. Precision Eng.* **21** 1026 (in Chinese) [贾建禄, 王建立, 赵金字, 王国强 2013 光学精密工程 **21** 1026]
- [17] Lin X D, Liu X Y, Wang J L, Wang F G, Wei P F 2013 *Opt. Precision Eng.* **21** 267 (in Chinese) [林旭东, 刘欣悦, 王建立, 王富国, 卫沛锋 2013 光学精密工程 **21** 267]
- [18] Zhang Y, Yang C P, Guo J, Kang M L, Wu J 2011 *HPLPB* **23** 571 (in Chinese) [张炎, 杨春平, 郭晶, 康美岑, 吴健 2011 强激光与粒子束 **23** 571]

# Analysis on reconstruction of virtual images of Fourier telescope

Yu Shu-Hai<sup>†</sup> Dong Lei Liu Xin-Yue Ling Jian-Yong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

( Received 6 March 2015; revised manuscript received 7 May 2015 )

## Abstract

Fourier telescope can realize high resolution imaging to remote, small and dim target by using laser as the light source. The signal-to-noise ratio of imaging system is easy to improve by increasing the area of receiver. However, numerical simulation shows that the reconstruction images sometimes has a virtual phenomenon. It reduces the quality of reconstruction images, and even cannot have a resolution to the imaging target. Based on Fourier telescope imaging principle, using T type transmitting array, the reason of forming virtual images is indicated by mathematical deduction. The spatial frequency error between the actual getting and setting would be produced when the laser beams scan the  $x$  or  $y$  axis with pitch error. The error would cause the random phase influence when calculating the single Fourier frequency of target by using phase closure on the axis and quadrant scan. Using integrated spatial frequency of transmitter array to reconstruct the image of target would cause a virtual phenomenon. By contrasting reconstruction images it is found that the image quality is reduced seriously, even the virtual phenomenon appears when the transmitting system is axially scanned with pitch error, and it decreases slightly on quadrant scan. In the present paper, we consider the reason of the phase closure of quadrant of T type transmitting array relies on axial frequency. At the same pitch error, different scan methods would cause different reconstruction images. The directions of virtual images are the same within the axial error. The computer simulation confirms the validity of the above analysis by three different modes of transmitter array through using the next field experiment parameters.

**Keywords:** Fourier telescope, spatial frequency error, image reconstruction

**PACS:** 42.25.Kb, 42.30.Kq, 06.30.Ft, 42.30.-d

**DOI:** [10.7498/aps.64.184205](https://doi.org/10.7498/aps.64.184205)

---

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [yushuhai\\_0707@sina.com](mailto:yushuhai_0707@sina.com)