

大气高阶扰动对傅里叶望远镜成像的影响分析

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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 傅里叶望远镜(FT)综合了激光主动照明和合成孔径的优点,采用相位闭合技术可以消除各发射望远镜间的粗大相位差及大气的低阶扰动对成像的影响,分辨率可突破单一望远镜的衍射极限。为了 FT 实际工程系统的实施,需探讨大气高阶扰动对 FT 成像质量的影响,文中模拟大气高度 36 km,通过等 Rytov 指数方法将大气分成 40 层并计算得到了每层的上下界限及每层相位屏的高度值。对于 33×33 T 型均匀间隔发射阵列,每层模拟了 1 626 个相位屏。光束传输采用夫琅和费衍射近似。通过计算机模拟,在不考虑噪声的情况下,对于 10 cm 的发射口径,得到大气高阶扰动对 FT 成像质量有微小影响的结论。重构结果与衍射极限图像的斯托里尔比(Strehl)由无大气时的 0.682 1 降低到 0.623 6。当信噪比为 100 时,Strehl 达到 0.452 5,可分辨目标。

关键词: 大气高阶扰动; 傅里叶望远镜; 成像系统; T 型均匀发射阵列; 数值模拟

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1582-06

High modes disturbance of atmosphere on the Fourier telescope imaging analysis

Yu Shuhai^{1,2}, Wang Jianli¹, Dong Lei¹, Liu Xinyue¹

(1. Changchun institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Fourier telescope (FT) is an imaging method that combines the advantages of active laser lighting and synthetic aperture. Using the phase closure technique can eliminate the coarse phase of two arbitrary launch telescopes and the effects of atmospheric low-level disturbance. The resolution of reconstructed image can overcome the diffraction limit of a single telescope. For the realization of the engineering systems of the Fourier telescope (FT), the image quality was explored when the light via the atmosphere with 36 km atmospheric height. The atmosphere was divided into 40 layers by the Rytov index method; the upper and lower boundaries of each floor and the height of each phase screen were calculated. To the 33×33 T-type emitter array with uniformly spaced, the number of simulated phase screens was 1 626. Fraunhofer diffraction approximation was used when beam from the emitting surface

收稿日期:2012-10-15; 修订日期:2012-11-13

基金项目:国家 863 计划(2011AAXX1003)

作者简介:于树海(1985-),男,博士生,主要从事傅里叶望远镜关键技术及光电信号处理方面的研究。

Email:yushuhai_0707@sina.com

导师简介:王建立(1971-),男,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像望远镜总体技术等方面的研究。Email:wangjianli@ciomp.ac.cn

to the target. Through computer simulation, without considering the noise, for the 10 cm emission caliber, we obtain the conclusion that the higher order disturbance of atmosphere has a slight impact on the FT imaging system. Without the atmospheric high order disturbance, the Strehl of reconstruction image and diffraction limit image is 0.682 1. With that the Strehl is reduced to 0.623 6. When the signal to noise ratio of 100, the Strehl reach 0.452 5, and the target can be discriminated.

Key words: atmospheric high modes turbulence; Fourier telescope; imaging systems;
T-type of launching; numerical simulation

0 引言

在深空目标成像探测领域中,由于目标距地面上万公里,传统光学直接成像受到目标亮度、光学系统衍射极限、大气湍流等因素的影响,成像探测的作用距离、分辨率受到极大的限制。一方面,研究人员增大望远镜的口径,采用自适应光学等技术解决上述问题,另一方面开展了非常规成像的研究。傅里叶望远镜(FT)作为非常规成像的一种备受关注,FT拥有合成孔径小孔径发射的优点及采用相位闭合技术可以消除低阶大气扰动和粗大的相位差,对目标回波信号的接收不同于传统的光学成像系统,采用造价低廉的定日镜作为能量接受系统,成像的分辨率取决于发射基线的长度而不是传统光学中的望远镜口径,这样就可以根据实际需求来合理配置基线,使系统更加灵活,分辨率可以突破单一望远镜衍射极限的限制^[1-5]。

近年来,国内学者对 FT 进行了跟踪研究,相继进行了理论分析和室内外实验验证^[6-10]。但 FT 系统的工程研究还没有展开,也鲜见对工程系统的理论研究。大气高阶扰动对成像质量的影响作为系统的关键技术之一,需要进行彻底地分析。文中在结合国内外现阶段研究成果的基础上,对 T 型均匀基线间隔配置的光束通过大气湍流后对成像质量的影响进行了研究,为接下来 FT 工程系统的实施奠定了理论基础。

1 傅里叶望远镜成像原理

FT 成像原理图如图 1 所示,基线上至少同时发射 3 束激光照射目标,每两个基线上的发射望远镜确定了一个空间频率,在目标表面形成干涉条纹。目标在照射的干涉条纹范围内移动,或者用声光频移器使一个光源相对另一个光源产生微小频移而使条

纹在目标上移动,实现将目标的空间频率信息在时域上进行编码。目标散射后返回信号为随时间变化的时域信号。对接收的信号进行傅里叶变换,即可抽取目标对的频谱信息。每个三重组利用相位闭合技术消除由大气低阶湍流及光学器件等引起的未知相位偏差。相位偏差消除后,比值只包含与目标有关信息,相位闭合原理和方法详见参考文献[1]。

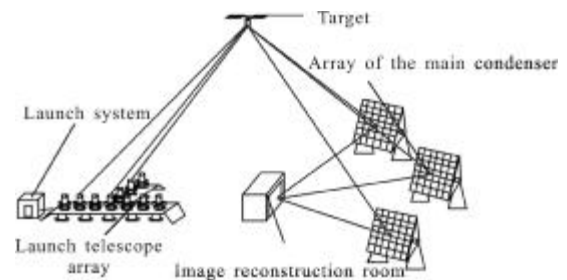


图 1 傅里叶望远镜成像原理

Fig.1 Imaging principle of Fourier telescope

为了从比值中获得非比值的傅里叶分量信息,必须完成一系列测量,对不同的发射基线配置,重构图像算法稍有差异,对于具有均匀间隔的点面发射器阵列而言,可简单地计算相邻比值之间的乘积即可得到每个估算的傅里叶分量^[1]。对于 T 型发射器阵列,首先得到坐标轴的傅里叶分量,重构方法可采用点面阵列重构方式,接着在扫描象限时,采用相位闭合技术得到比值,再采用参考文献^[1]的方法即可重构目标图像。

2 大气相位屏模拟

2.1 相位屏模拟

文中采用功率谱反演法(FFT)模拟大气湍流相位屏^[12],大气湍流功率谱模型选择 Kolmogorov 谱^[13],大气折射率结构函数 C_n^2 采用 Modified HV-21 模型(弱湍流模型)。相邻相位屏 C_n^2 的选择采用两相位屏 C_n^2 间湍流大气折射率结构常数的路径平均值^[14]。

$$Cn^2 = \frac{1}{\Delta z_i} \int_{z_{i-1}}^{z_i} Cn^2(z) dz \quad (1)$$

式中: Δz_i 为相邻两层相位屏的间距; z_{i-1} 为第 i 层相位屏的下界限; z_i 为第 i 层相位屏的上界限。

参考文献[15]采用 Rytov 指数方法计算相位屏间隔 Δz_i 时, 将 Cn^2 近似选择上 $i-1$ 层的 Cn^2 值, 但参考文献[14]已经证明了按照公式(1)选择 Cn^2 的正确性, 因此文中对相位屏间隔的 Rytov 指数表达进行了改进, 如公式(2)所示:

$$\beta_0^2(\Delta z_i) = 1.23 \int_{z_{i-1}}^{z_i} Cn^2(z) dz \times K^{7/6} \Delta z_i^{5/6} = c \quad (2)$$

式中: $\beta_0^2(\Delta z_i)$ 为相邻两层相位屏的光强起伏; c 为常数; $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为光波数; λ 为激光波长。相位屏间隔的选择还需要满足公式(3)-(5):

$$\Delta z > L_0 \quad (3)$$

$$\Delta z < N \Delta x^2 / \lambda \quad (4)$$

$$\beta_0^2(\Delta z) < 0.1 \text{ 且 } \beta_0^2(\Delta z) < 0.1 \beta_0^2(L) \quad (5)$$

式中: L_0 为相位屏外尺度; Δx 为采样点间隔; N 为相位屏采样数; L 为光束经过大气传播的总距离; $\beta_0^2(L)$ 指光束通过整个大气湍流的光强起伏。当光束为平面波时, $\beta_0^2(L) = 4 \times 0.563 \times K^{7/6} \int_0^L Cn^2(L-z)^{5/6} dz$, 根据大气层高度约为 36 km, 首先计算出光束传播 36 km 时对应的 $\beta_0^2(L)$, $\beta_0^2(L) = 0.64$ 带入公式(5), 得到公式(6),

$$\beta_0^2(\Delta z) < 0.064 \quad (6)$$

因此相位屏间隔需要满足公式(3)、(4)和(6)。

实际系统光学平台上的发射光束距离地面高度约为 1 m, 根据公式(2), 当 $c = 1 \times 10^{-4}$ 时, 36 km 大气可以分成 40 层, 各层对应的相位屏上下边界高度如表 1 所示。其中, 1 表示第一层相位屏的下界限; 21 表示第一层相位屏的上界限, 同时也是第二层相位屏的下界限。

表 1 各层相位屏上下界高度(单位: m)

Tab.1 Upper and lower bounds height of each floor of phase screen(Unit: m)

1	21	44	70	100	135	178
232	305	412	573	789	1 038	1 314
1 621	1 966	2 360	2 820	3 370	4 045	4 865
5 752	6 573	7 298	7 952	8 560	9 140	9 706
10 268	10 836	11 418	12 024	12 666	13 360	14 127
15 001	16 041	17 366	19 282	23 195	36 000	

相应的光强起伏 $\beta_0^2(\Delta z)$ 如图 2 所示, 由图可以得出相邻两层相位屏的光强起伏满足公式(6)。

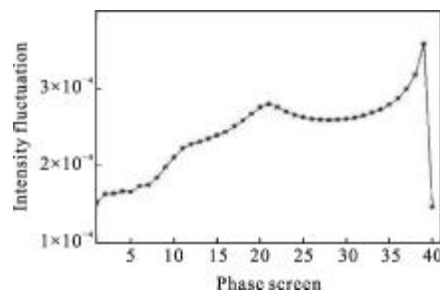


图 2 相邻两层相位屏的光强起伏

Fig.2 Intensity fluctuation of the adjacent two layers of phase screen

通过表 1 计算得到的相位屏上下界限, 根据公式(7)计算得到了相应的相位屏高度。计算结果如表 2 所示。

$$\int_{z_{i-1}}^{z_i} Cn^2(z)(z_i - z)^{\frac{2}{3}} dz = \int_{z_i}^{z_{i+1}} Cn^2(z)(z_i - z)^{\frac{2}{3}} dz \quad (7)$$

式中: Z_i 和 Z_{i-1} 分别为第 i 层相位屏的上下界限; Z_i 为第 i 层相位屏的高度。

表 2 各层相位屏的高度(单位: m)

Fig.2 High of each phase screen (Unit: m)

11	32.5	57	85	117.5	156.5	205
268.5	358.5	492.5	681	913.5	1 176	1 467
1 793	2 163	2 590	3 095	3 707	4 455	5 308
6 162	6 935	7 625	8 256	8 850	9 423	9 987
10 552	11 127	11 721	12 345	13 013	13 744	14 564
15 521	16 704	18 324	21 239	29 598		

综上, 模拟相位屏参数为: 湍流外尺度 10 m; 湍流内尺度 1 mm; 相位屏采样点间隔 1 mm; 激光波长 532 nm; 模拟结果如图 3 所示。

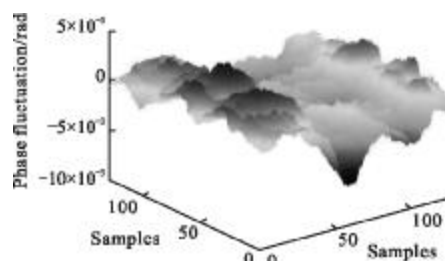


图 3 模拟的相位屏

Fig.3 Simulation of phase screen

2.2 光束通过相位屏模拟

傅里叶望远镜不同于传统光学望远镜, 发射口

径较小,抽取的傅里叶系数具有复共轭的特点^[6],因此对于 33×33 的发射基线需要抽取 542 个傅里叶分量点即可。成像距离为 36 000 km,大气层高度 36 km,相位屏层数为 40 层,模拟大气相位屏只需要能覆盖发射口径,但抽取不同的傅里叶分量时需要重新模拟相位屏,因此每层总需要模拟相位屏 1 626 个小相位屏,同时光束在空间中的传输采用夫琅和费近似。

在不考虑衍射的情况下,单束光在观察平面的场可以表示成公式(8)。其中,ω为光束圆频率,t为采样时间,φ₁为光束的粗大相位差及低阶大气扰动引起的相位差,φ₂为高阶大气扰动引起的相位差^[6]。

$$U(x, y, t) = E \exp(-i(\omega t - kr + \varphi_1 + \varphi_2(x, y, t))) \quad (8)$$

考虑到衍射对成像质量的影响时,公式(8)需要做适当的改变。公式(9)表示光束的出瞳光场分布记为 U_m。在大气传输过程中受到夫琅和费衍射和大气相位屏的共同影响,Δz_m为两层相位屏之间的间隔距离,U_{m+1}为光束经过距离 Δz_m后的场分布,如公式(10)所示。

$$U_m(x_0, y_0) = E \exp(-i(\omega t - kr + \varphi_1)) \quad (9)$$

$$U_{m+1}(x_2, y_2) = -\frac{i}{\lambda \Delta z_m} \text{FT}[U_m(x_1, y_1) \times \exp(-i(\varphi_2(x, y, t)))] \quad (10)$$

数值模拟条件:

(1) 发射光束采用平面波近似。

(2) 先计算出 40 层大气相位屏对光束相位的集总影响,此时假设光束在大气层中的传输保持平面波型,光束口径不变。

(3) 再将步骤(2)计算的集总相位作用于发射口径处的光场,光束再进行衍射传播到目标表面。

(4) 采用 Modified HV-21 大气结构函数的条件下,计算得到大气相干长度 r₀ 为 19.21 cm,可以说大气条件非常好。

模拟三光束通过大气后在目标表面图像,如图4所示。



图 4 目标和三光束相互作用图像

Fig.4 Image of interaction of target and three-beam

3 成像结果

模拟参数:单一望远镜发射光束口径 10 cm(方形口径);返回的时域信号采样点数:128;T型发射结构的基线长度:33×33;考虑到计算时间和计算机内存,根据采样定理及 FT 的实际情况对目标大小和基线间隔进行了比例模拟,基线间隔 0.1 m,即发射两光束最小形心间隔为 0.2 m;目标尺寸 0.5 m。

采用重构图像与理想图像(衍射极限图像)的斯托里尔比^[4](Strehl)公式(12)大小来评价大气高阶扰动对成像质量的影响。

$$H(x, y) = O_T \otimes O_R \iint I_T^*(k_x, k_y) I_R(k_x, k_y) \cdot \exp(-i \cdot 2\pi(k_x f_x + k_y f_y)) d_kx d_ky \quad (11)$$

$$S = \frac{\max |H(x, y)|^2}{\iint O_T^*(x, y) O_T(x, y) dx dy \iint O_R^*(x, y) O_R(x, y) dx dy} \quad (12)$$

式中:O_T表示真实图像灰度值分布,在此为衍射极限图像灰度值;O_R表示重构图像灰度值;I_T和 I_R表示两者傅里叶变换后的频谱值,将公式(11)带入公式(12)即可计算出 Strehl。成像目标如图 5 所示。



图 5 成像目标

Fig.5 Imaging target

衍射极限图像见图 6。在不考虑噪声的情况下,



图 6 衍射极限图像

Fig.6 Diffractive limit image

分别就有无大气高阶扰动对系统进行模拟, 重构结果如图 7 和 8 所示。

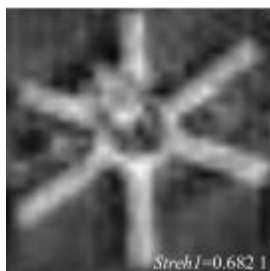


图 7 无大气重构图像

Fig.7 Reconstruction image without atmosphere

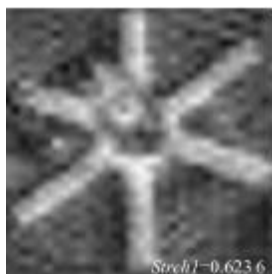


图 8 存在大气重构图像

Fig.8 Reconstruction image with atmosphere

在考虑大气高阶扰动的情况下, 当选择的高斯白噪声且信噪比分别为 50 和 100 时的重构结果如图 9 至 10 所示。

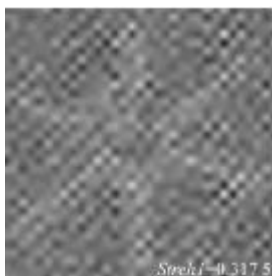


图 9 SNR=50 时重构图像

Fig.9 Reconstruction image with SNR=50



图 10 SNR=100 时重构图像

Fig.10 Reconstruction image with SNR=100

可以看出: 在存在大气高阶扰动的情况下, 图 8 的图像左上角的太阳能帆板边缘变得模糊, 同时卫星顶点发生了偏移, 低灰度单位重构后变得模糊难以分辨, 但目标整体还是可以分辨的, 与衍射极限图像的 Strehl 比下降 0.058 5, 受大气高阶扰动的影响较小。当信噪比为 100 时即可清晰分辨目标细节。

4 结 论

为了探索大气高阶扰动对傅里叶望远镜成像的影响, 文中将大气采用等 Rytov 指数方法分为 40 层, 针对 33×33 的 T 型均匀间隔的发射机构, 每层模拟 1 626 个相位屏, 在计算量上满足了系统验证的需要。通过无噪声的条件下分别对有无大气高阶扰动对成像结果进行了模拟, 模拟发现在存在大气高阶扰动的情况下, Strehl 仅下降 0.058 5, 受其影响较小。这主要是因为以下两点:

(1) 文中选择的发射口径较小为 10 cm, 众多周知, 口径越大受大气的影响越大, 因而大气高阶扰动对文中光束的相位波动较小。

(2) 考虑到傅里叶望远镜现拟在夜间对同步轨道卫星成像探测, 因此文中采用的大气折射率结构函数为修正的 HV21 模型, 是一种夜间弱湍流模型, 通过计算得到大气相干长度 r_0 为 19.21 cm, 大气条件非常好。若选择 HV21 强湍流模型时, 对应的 r_0 仅为 5.34 cm, 势必会降低成像的质量。不同的大气折射率结构函数对 FT 成像质量的影响将在后续工作中着重考虑。

通过对不同的信噪比条件进行成像模拟发现, 当 SNR=100 时, 存在大气高阶扰动的情况下, 重构图像的 Strehl 下降了 0.171 1, 当 SNR=50 时, 重构图像的 Strehl 比下降了 0.306 1。FT 系统受噪声的影响非常明显, 在以往的室内外实验中, 研究人员通常采用单周期多采样点且对多个采样周期进行累和平均的方法来降低噪声对系统的影响, 并取得了较好的结果。其他的抑制噪声的方法需要系统研究。

文中光束在大气传播过程中的光束扩展和直径质心漂移文中并没有考虑, 这些因素同样会对成像质量造成一定的影响, 将是后续工作的主要研究内容。

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]. OSA, 1996, 13(2): 351-364.
- [2] Brinkley T J, Sand1er D. Effect of atmospheric turbulence and jitter on Fourier telescope imaging systems [C]//SPIE, 1999, 3815: 42-47.
- [3] MacDonald Kenneth R, Boger James K, Fetrow M P, et al. An experimental demonstration of Fourier telescope [C]//SPIE, 1999, 3815: 23-29.
- [4] E Louis Cuellar, James Stapp, Justin Cooper. Laboratory and field experimental demonstration of a Fourier telescope imaging system[C]//SPIE, 2005, 5896(D): 1-14.
- [5] E Louis Cuellar, Justin Cooper, James Mathis, et al. Laboratory demonstration of a multiple beam Fourier telescope imaging system[C]//SPIE, 2008, 7094(G): 1-12.
- [6] Dong Lei, Liu Xinyue, Wang Jianli. The realization of Fourier telescope technology in laboratory [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(6): 999-1002. (in Chinese)
董磊, 刘欣悦, 王建立. 实验室环境下傅里叶望远镜技术的实现[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 999-1002.
- [7] Chen Wei, Li Quan, Wang Yangui. Object reconstruction of Fourier telescope based on all phase spectrum analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3443-3446. (in Chinese)
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, 2011, 30(12): 3443-3446.
- [8] Chen Wei, Li Quan, Wang Yangui. Experimental research of Fourier telescope imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0311001: 1-6. (in Chinese)
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.
- [9] Dong Lei, Liu Xinyue, Lin Xudong, et al. Improvement of performance and analysis of results of field experiments of Fourier telescope [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32 (2): 0201004. (in Chinese)
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.
- [10] Yu Shuhai, Wang Jianli, Dong Lei, et al. Introduction of dominating factors of multiple beam [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(12): 1341-1345. (in Chinese)
于树海, 王建立, 董磊, 等. 多光束傅里叶望远镜成像质量主要因素分析[J]. 激光与红外, 2011, 41(12): 1341-1345.
- [11] Zhang Yan, Yang Chunping, Guo Jing, et al. Spectrum extraction mode for Fourier telescope in laboratory [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 571-576. (in Chinese)
张炎, 杨春平, 郭晶, 等. 实验室中傅里叶望远镜频谱抽取方式[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 571-576.
- [12] Lane R G, Glindemann A, Dainty J C. Simulation of a Kolmogorov phase screen[J]. Waves Random Media, 1992(2): 209-224.
- [13] Rod Frehlich. Simulation of laser propagation in a turbulent atmosphere[J]. Applied Optics, 2000, 39(3): 393-397.
- [14] Qian Xianmei, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Selection of Cn^2 between phase screens for simulating laser propagation along an inhomogeneous turbulent path [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(10): 1856-1860. (in Chinese)
钱仙妹, 朱文越, 饶瑞中. 非均匀湍流路径光传播数值模拟中相位屏间 Cn^2 的选取 [J]. 光学学报, 2008, 28(10): 1856-1860.
- [15] Qing Xianmei, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Phase screen distribution for simulating laser propagation along an inhomogeneous atmospheric path [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9): 6633-6638. (in Chinese)
钱仙妹, 朱文越, 饶瑞中. 非均匀湍流路径上传播数值模拟的相位屏分布[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6633-6638.
- [16] Rhodes William T, Diego Pava, Fraser Dalgleish, et al. High-resolution imaging through horizontal-path turbulence [C]// SPIE, 2011, 8122: 812202-1-812202-5.