

## 相干场成像技术接收镜精度对传递函数的影响\*

相里斌<sup>1)</sup> 张文喜<sup>1)2)†</sup> 伍洲<sup>1)</sup> 吕笑宇<sup>1)</sup> 李杨<sup>1)</sup> 周志盛<sup>1)3)</sup> 孔新新<sup>1)</sup>

1) (中国科学院光电研究院, 北京 100094)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (中国科学技术大学精密机械及精密仪器系, 合肥 230027)

(2013年6月26日收到; 2013年8月19日收到修改稿)

根据相干场成像技术(又称傅里叶望远镜)接收镜的特点,研究了接收镜偏差对相干场成像技术光学传递函数的影响,推导了光学传递函数与接收光路光程均方差的关系式.该式表明相干场成像技术的光学传递函数是接收光路光程均方差与频差乘积的平方的负指数函数.为确定接收系统精度提供了理论依据.

关键词: 相干场成像, 傅里叶望远镜, 误差, 光学传递函数

PACS: 42.25.Kb, 42.30.Kq, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.62.224201

## 1 引言

相干场成像技术基本原理为采用分布式布局的相干激光束照射空间目标<sup>[1-3]</sup>,接收目标的反射信息,并利用解调技术获得目标的空间频谱,采用相位闭合技术抑制大气湍流的影响<sup>[4-9]</sup>,最后通过对空间频谱信息傅里叶逆变换重构目标的几何图像<sup>[10-12]</sup>,它是一种能够对远距离目标进行高分辨率成像的新型间接成像技术.

因为受发射激光束能量的限制且探测目标距离较远,探测器接收的信号较弱.为了提高探测能力,相干场成像技术需要采用面积较大的接收镜.如GLINT计划采用的接收镜面积为4000 m<sup>2</sup><sup>[13,14]</sup>,SAINT计划采用望远镜阵列<sup>[2]</sup>.大面积接收镜一般采用子镜拼接方案<sup>[15]</sup>,拼接精度要求太高,系统的造价会非常昂贵,精度要求太低又会影响到成像质量.如何在满足成像质量的前提下,选择最优的精度要求,尽可能降低接收系统的造价,具有重要的意义.

目前,关于接收镜精度与相干场成像质量关系的研究还未见报道.本文根据相干场成像技术接收镜的特点,研究了接收镜精度对相干场成像技术光

学传递函数的影响,推导了光学传递函数与接收光路光程均方差的关系式,并进行了仿真实验.

## 2 接收镜精度对光学传递函数影响的理论分析

相干场成像技术发射激光束的初始相位误差及大气湍流引起的相位误差可以通过相位闭合算法抑制,下面的分析过程对此不做考虑.接收到的信号可表示为

$$G(t) = \iint_{\Sigma} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N I \cdot O(k_{mn}) \times e^{i[\Delta\omega_{mn}(t+L(r)/c)]} \frac{ds}{2\pi L(r)^2}, \quad (1)$$

其中, $O(k_{mn})$ 为目标的空间频谱, $k_{mn}$ 为空间频率, $L(r)$ 为目标反射的光线经接收镜面元 $ds$ 到达探测器面的光程, $r$ 表示面元 $ds$ 的坐标信息, $N$ 为单次发射激光束个数, $\Delta\omega_{mn}$ 为第 $m$ 束发射激光和第 $n$ 束发射激光的频差, $t$ 为探测时间, $c$ 为光速.理想情况下,接收面中每个面元对应的 $L(r)$ 值基本相等,即

$$L(r) = L_p, \quad (2)$$

\* 国家高技术研究发展计划(批准号:2012AA7031003A)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangwenxi@aoe.ac.cn

$L_p$  为理想情况下的光程. 考虑到实际的接收光路, 设  $L_R(r)$  相对于  $L_p$  的偏差为  $\Delta L_R(r)$ , 即

$$\Delta L_R(r) = L_R(r) - L_p, \quad (3)$$

因为  $\Delta L_R(r) \ll L_p$ , 所以

$$\frac{1}{L_R(r)^2} \approx \frac{1}{L_p^2}. \quad (4)$$

把 (2), (3), (4) 式代入 (1) 式, 实际系统探测信号可表示为

$$\begin{aligned} G(t) &= \iint_{\Sigma} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N I \cdot O(k_{mn}) \\ &\quad \times e^{i[\Delta\omega_{mn}(t+L_R(r)/c)]} \frac{ds}{2\pi L_R(r)^2} \\ &\approx \iint_{\Sigma} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N I \cdot O(k_{mn}) \\ &\quad \times e^{i[\Delta\omega_{mn}(t+t_0)+\Delta\omega_{mn}(L_R(r)-L_p)/c]} \frac{ds}{2\pi L_p^2} \\ &= \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{1}{2\pi L_p^2} I \cdot O(k_{mn}) e^{i[\Delta\omega_{mn}(t+t_0)]} \\ &\quad \times \iint_{\Sigma} e^{i[\Delta\omega_{mn}\Delta L(r)/c]} ds. \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $t_0 = L_p/c$ . 对  $G(t)$  进行解调, 并经过相位闭合及归一化等处理后, 得到目标空间频谱为

$$\begin{aligned} O'(k_{mn}) &= O(k_{mn}) \frac{1}{S} \iint_{\Sigma} e^{i[\Delta\omega_{mn}\Delta L/c]} ds, \\ m &= 1, 2, \dots, N; \quad n = 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $S$  为接收镜的总面积,  $\Sigma$  为接收镜的积分区间. 根据光学传递函数的定义<sup>[16-18]</sup>, 该系统的传递函数  $H(k_{mn})$  为

$$\begin{aligned} H(k_{mn}) &= \frac{O'(k_{mn})}{O(k_{mn})} = \frac{1}{S} \iint_{\Sigma} e^{i[\Delta\omega_{mn}\Delta L/c]} ds, \\ m &= 1, 2, \dots, N; \quad n = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (7)$$

可见, 接收镜偏差引起的接收光路光程变化会直接影响系统的光学传递函数, 从而影响系统的成像质量. 因为  $\Delta L$  为随机变量, (7) 式实际上是求随机函数  $e^{i[\Delta\omega_{mn}\Delta L/c]}$  的均值. 一般情况随机变量  $\Delta L$  服从  $N(0, \sigma^2)$  的正态分布, (7) 式可表示为

$$\begin{aligned} H(k_{mn}) &= \frac{1}{S} \iint_{\Sigma} e^{i\frac{\Delta\omega_{mn}}{c}\Delta L} ds \\ &\approx \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\frac{\Delta\omega_{mn}}{c}\Delta L} e^{-\frac{\Delta L^2}{2\sigma^2}} d(\Delta L), \end{aligned}$$

$$m = 1, 2, \dots, N; \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

(8) 式表明传递函数  $H(k_{mn})$  实际上是随机变量  $\Delta L$  的特征函数<sup>[19]</sup>,

$$\begin{aligned} H(k_{mn}) &= e^{-\frac{1}{2}\sigma^2(\frac{\Delta\omega_{mn}}{c})^2} = e^{-\frac{2\pi^2}{c^2}(\sigma\Delta f_{mn})^2}, \\ m &= 1, 2, \dots, N; \quad n = 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (9)$$

(9) 式给出了光学传递函数  $H(k_{mn})$  与接收光束光程均方差  $\sigma$  及激光束频差  $\Delta f_{mn}$  之间的相互关系. 根据 (9) 式可以确定相干场成像系统的接收光路光程的均方差, 从而确定该系统接收镜的精度. 图 1 为在光程均方差分别为 10, 1, 0.1 和 0.01 m 的情况下, 光学传递函数  $H(k_{mn})$  随频差  $\Delta f_{mn}$  变化的曲线.

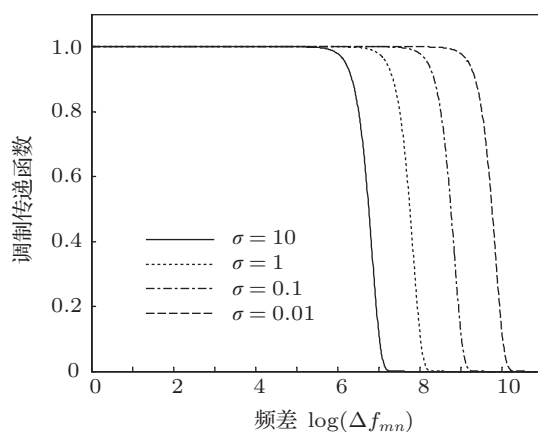


图 1 光学传递函数与频差的关系

根据上述分析, 结合图 1 所示, 我们可以得出如下结论:

- 1) 接收镜偏差引起接收光路光程变化, 会导致相干场成像系统的光学传递函数值降低;
- 2) 发射激光束的频差也会导致光学传递函数值降低, 频差越大, 对接收镜精度的要求越高, 为降低系统的设计及加工难度应尽可能降低发射激光束之间的最大频差;
- 3) 通常情况下, 相干场成像系统的频差小于 100 MHz, 此时接收镜的要求精度为分米量级, 通过廉价的光学装置即可实现该精度;
- 4) 对于多光束相干场成像系统, 单次发射几十束激光束, 要求任意两束激光的频差不同, 会导致不同空间频率对应的光学传递函数差别较大, 可以通过合理选择发射激光束的频差分布提高系统的成像质量.

### 3 仿真分析

仿真系统的具体参数为发射阵列采用  $T$  型, 单次发射 46 束相干激光束, 可获得  $31 \times 31$  个空间频谱点; 激光束的最小频差为 10 kHz, 最大频差为 17.03 MHz, 频差的分布符合 Golomb ruler<sup>[20,21]</sup>; 探测目标为卫星图像随机选取; 接收系统面积为  $100 \text{ m}^2$ , 采用 100 个面积为  $1 \text{ m}^2$  的子镜拼接而成, 为了减小仿真时间, 设子镜没有误差; 目标轨道高度为 1000 km. 具体仿真过程如下.

首先, 在接收镜没安装偏差的情况下, 即  $L(r) = 1000000 \text{ m}$  时, 把上述参数和  $L(r)$  代入 (1) 式中, 得到理想接收镜情况下的探测数据  $G(t)$ , 对  $G(t)$  解调和相位闭合处理, 可得到理想接收镜情况下探测的目标空间频谱信息  $O(k_{mn})$ .

其次, 给定一个接收光路光程的均方差, 随机生成服从正态分布的接收光路光程偏差值  $\Delta L(r)$ , 则每个接收光路的光程  $L(r) = 1000000 + \Delta L(r)$ . 把上述仿真参数和  $L(r)$  代入 (1) 式中, 得到接收光路存在偏差情况下的探测数据  $G'(t)$ , 对  $G'(t)$  解调和

相位闭合处理, 获得实际情况下的目标空间频谱信息  $O'(k_{mn})$ . 根据 (7) 式可获得该系统的光学传递函数  $H'(k_{mn})$ , 即

$$H'(k_{mn}) = \frac{O'(k_{mn})}{O(k_{mn})}.$$

最后, 把随机序列  $\Delta L(r)$  的均方差  $\sigma$  和每个空间频率  $k_{mn}$  对应的激光束频差  $\Delta f_{mn}$  代入 (9) 式, 计算出系统的光学传递函数  $H(k_{mn})$ . 比较仿真得到的光学传递函数  $H'(k_{mn})$  和通过 (9) 式计算得到的光学传递函数  $H(k_{mn})$  的大小, 验证 (9) 式是否正确.

图 2 为接收光路光程均方差分别为 0.064, 0.615 和 3.948 m 时, 仿真得到的光学传递函数的分布图. 从图 2 中可以看出, 当接收光路光程的均方差较小时, 系统的调制传递函数 (MTF) 值很高; 当光程的均方差大到一定程度时, 系统的光学传递函数数值很不理想, 如图 2(c) 所示.

图 3 给出了系统中两个空间频率点光学传递函数的仿真结果和理论结果, 两个空间频率点对应的频差分别为 17.03 和 5.6 MHz. 从图 3 可以看出, 仿真结果和理论结果基本一致, 验证了理论 (7) 式的正确性.

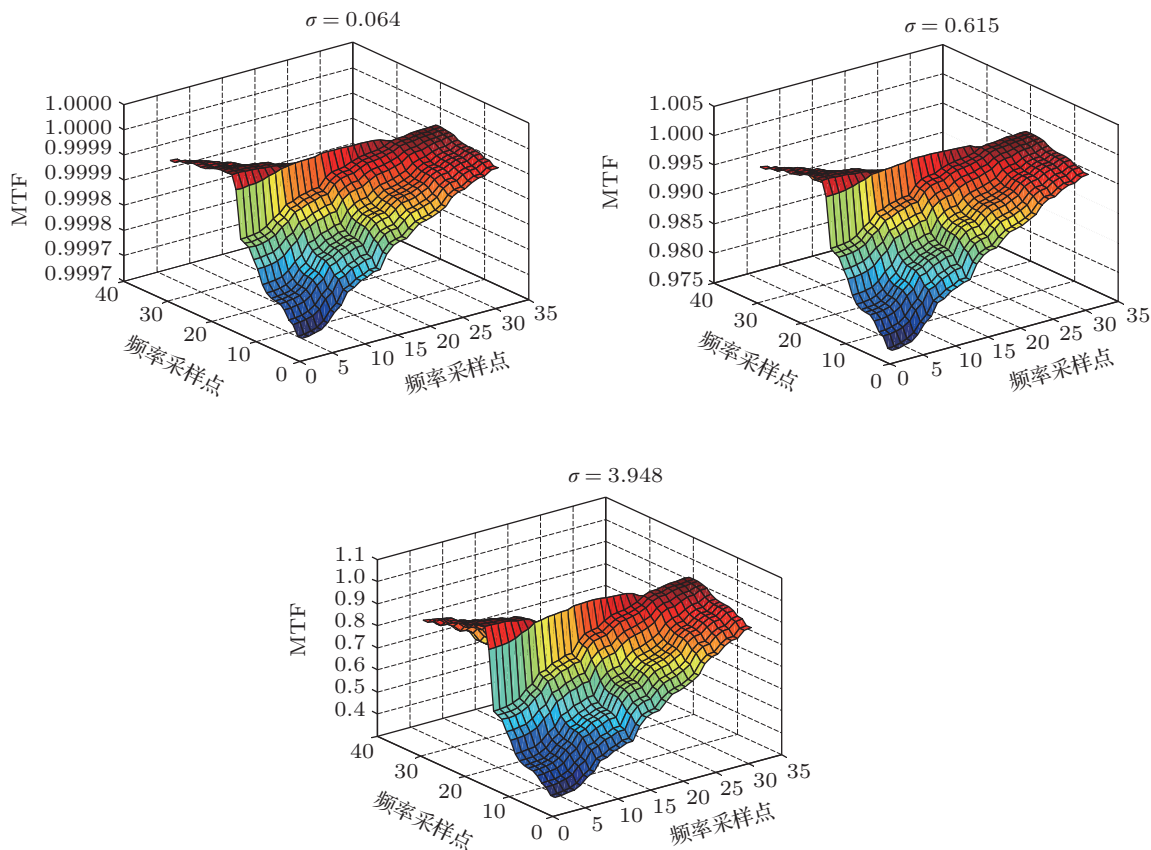


图 2 不同光程均方差下系统的光学传递函数

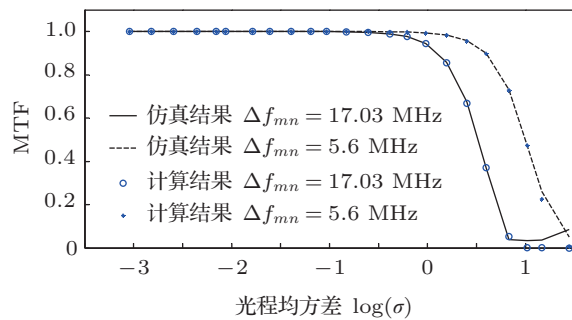


图3 光学传递函数与光程均方差的关系

## 4 结论

研究了相干场成像技术接收光路光程偏差对成像质量的影响, 给出接收光路光程均方差与光学传递函数的关系式, 通过计算机仿真验证了关系式的正确性. 因此, 在满足系统成像质量的前提下, 根据该关系可以比较方便地确定接收镜的精度上限, 从而尽可能地降低接收系统的复杂度和造价. 此关系式可以作为确定相干场成像技术接收系统精度的理论依据, 具有较强的工程指导意义.

- [1] Holmes R B, Ma S, Bhowmik A, Greninger C 1996 *J. Opt. Soc. Am. A* **13** 351
- [2] Stapp J, Spivey B, Chen L, Leon L, Hughes K, Sandler D, Cuellar E L 2006 *SPIE* **6307** 630701
- [3] Liu P S, Lü B D 2007 *Chin. Phys.* **16** 411
- [4] Liu Y Y, Lü Q B, Zhang W X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 124201 (in Chinese) [刘扬阳, 吕群波, 张文喜 2012 物理学报 **61** 124201]
- [5] Li B, Tan Z W, Zhang X X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084204 (in Chinese) [李波, 谭中伟, 张晓兴 2011 物理学报 **60** 084204]
- [6] Chu X X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 029201
- [7] Ji X L, Pu Z C 2011 *Chin. Phys. B* **20** 014207
- [8] Wang S, Yang S H, Wu X, Zhao C M, Zhu Q H 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 084202
- [9] Chu X X, Liu Z J, Wu Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 094201
- [10] Holmes R B, Brinkley T 1999 *Proc. SPIE* **3815** 11
- [11] Cuellar E L, Stapp J, Cooper J 2005 *Proc. SPIE* **5896** 58960D
- [12] Cuellar E L, Cooper J, Mathis J, Fairchild P 2008 *Proc. SPIE* **7094** 70940G
- [13] Ford S D, Voelz D G, Gamiz V L, Gamiz V L, Storm S L, Czyzak S R 1999 *Proc. SPIE* **3815** 2
- [14] Thornton M A, Oldenettel J R, Hult D W, Koski K, Depue T, Cuellar L, Balfour J, Roof M, Yarger F D, Newlin G, Ramzel L, Buchanan P 2002 *Proc. SPIE* **4489** 78
- [15] Mathis J, Stapp J, Cuellar E L, Cooper J, Morris A, Fairchild P, Hult D, Koski K, Ramzel L, Thornton M A 2005 *Proc. SPIE* **5896** 58960F
- [16] Goodman J W 2011 *Introduction to Fourier Optics* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p100 (in Chinese) [Goodman J W 2011 傅里叶光学导论 (北京: 电子工业出版社) 第 100 页]
- [17] 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, 李杨, 伍洲, 周志盛 2013 物理学报 **62** 164203]
- [18] Xiang L B, Yuan Y, Lü Q B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5399 (in Chinese) [相里斌, 袁艳, 吕群波 2009 物理学报 **58** 5399]
- [19] Ye Q X, Shen Y H 2007 *Practical Mathematics Handbook* (Beijing: Science Press) p495 (in Chinese) [叶其孝, 沈永欢 2007 实用数学手册 (北京: 科学出版社) 第 495 页]
- [20] Kong X X, Huang M, Zhang W X 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 1211001 (in Chinese) [孔新新, 黄旻, 张文喜 2012 光学学报 **32** 1211001]
- [21] Kong X X, Huang M, Zhang W X, Wu Z, Li Y, Zhou Z S 2013 *Laser Optoelectron. Prog.* **50** 011102 (in Chinese) [孔新新, 黄旻, 张文喜, 伍洲, 李杨, 周志盛 2013 激光与光电子学进展 **50** 011102]

# Optical transfer function of coherent field imaging based on deviation of receptors\*

Xiang Li-Bin<sup>1)</sup> Zhang Wen-Xi<sup>1)2)†</sup> Wu Zhou<sup>1)</sup> Lü Xiao-Yu<sup>1)</sup> Li Yang<sup>1)</sup>  
Zhou Zhi-Sheng<sup>1)3)</sup> Kong Xin-Xin<sup>1)</sup>

1) (*Academy of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology, Hefei 230027, China*)

(Received 26 June 2013; revised manuscript received 19 August 2013)

## Abstract

According to the feature of receptor system of coherent field imaging technique, also known as Fourier telescope, the influence of the deviation of receptors on optical transfer function (OTF) of coherent field imaging technique is investigated, and the relation between OTF and optical distance mean square deviation of receptor is also derived, which indicates that the OTF of coherent field imaging technique is a negative index function of square of product of optical distance mean square deviation and frequency difference. It can provide theoretical basis of determining the accuracy of receptor system.

**Keywords:** coherent field imaging, Fourier telescope, deviation, optical transfer function

**PACS:** 42.25.Kb, 42.30.Kq, 07.07.Df

**DOI:** 10.7498/aps.62.224201

---

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2012AA7031003A).

† Corresponding author. E-mail: zhangwenxi@aoe.ac.cn