

大气湍流畸变对空间目标清晰干涉成像仿真研究*

刘扬扬[†] 吕群波 张文喜

(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

(2011年8月24日收到; 2011年10月10日收到修改稿)

本文利用功率谱反演法分别展开对符合 Kolmogonov 统计规律和修正后的 Von Karmen 统计规律的大气湍流畸变波前相位屏进行了数值模拟研究. 得到各种模型下相位屏对该成像系统干涉成像图. 仿真结果表明, 采用闭合相位原理, 基本可以消除大气湍流对光束波前的影响, 验证了采用相位闭合技术的优势.

关键词: 干涉成像, 大气湍流, 功率谱, 波前相位屏

PACS: 42.25.Bs, 42.25.Hz, 42.30.-d

1 引言

空间目标干涉成像系统, 隶属于一种光学干涉成像技术, 工作原理为: 使用多个不同频率光束照明目标, 形成一定空间频率的干涉条纹与被观察目标相互作用, 目标散射光形成的回波信号就包含了目标强度分布函数的图像频谱信息, 再将多个回波信号通过相位闭合迭代算法得到所需频谱值. 而干涉条纹的空间频率恰好就是该频谱值的频域坐标, 不同空间频率的干涉条纹与目标作用, 获得了目标不同频域坐标下的频谱值, 再通过傅里叶反变换重建出目标图像. 其系统实现原理示意图如图 1 所示^[1].

长久以来, 大气湍流都是限制光束传输系统, 成像系统等光学系统性能的重要因素. 尤其是对于空间目标干涉成像系统, 作为大气环境中的光学系统, 往往从地面发射光束照明空中目标, 光束传输路径近则几公里, 远至上万公里^[2]. 这期间光束波前收到大气湍流扰动影响扭曲变形, 当扰动强烈时还会造成干涉光学系统成像图样的畸变, 严重影响成像性能^[3,4].

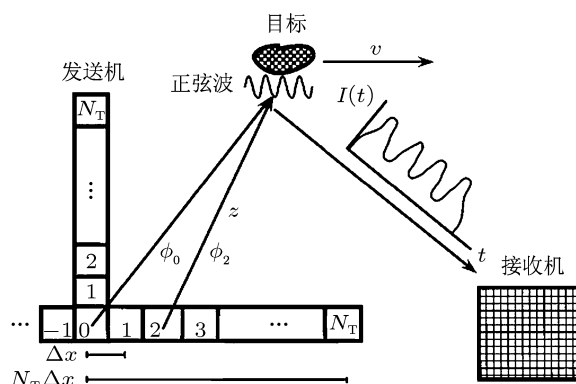


图 1 空间目标干涉成像系统原理图

为此本文将采用在上行信道加入湍流相位屏的方法, 对空间目标干涉成像系统进行数值模拟, 计算和讨论空间目标干涉成像技术在大气湍流作用下得到的成像结果.

大气湍流效应是由于大气温度的随机变化产生大气密度的随机变化, 其累积效应导致大气折射率呈现明显不均匀性, 从而导致光束相位变化, 波前变形^[5,6], 对目标重建图像质量带来影响. 除了用实验和理论分析的方法研究大气湍流, 数值模拟也是研究湍流问题的有效手段.

用数值模拟方法研究大气湍流对光学系统影

* 中国科学院知识创新工程重大项目 (批准号: 090202B01Y) 资助的课题.

[†] E-mail: liuyangyang@aoc.ac.cn

响的核心问题之一是模拟大气湍流畸变相位屏. 已发展了多种方法产生湍流效应随机相位屏, 这些方法基本上可由相位波前的表达方式分为两类: 一种是根据大气湍流的功率谱密度函数得到大气扰动相位分布, 称为“功率谱反演法”. 谱反演法首先由 McGlamery 提出, 以后得到了广泛的应用和发展 [7].

大气湍流的扰动使光束传播中相位造成强烈的随机起伏, 导致干涉条纹图样畸变, 从而影响到重建过程中频谱值的精确采集. 而相位屏理论是处理随机介质对波传播影响的一种有效地近似方法 [8,9]. 理论中将传输路径 z 分为 n 段, 把每一段距离 ($\Delta z = z/n$) 中大气湍流对光束波相位的影响视为一个相位屏, 如图 2 所示.

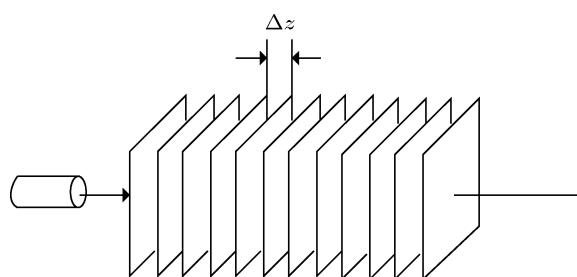


图 2 大气湍流的分层模型

数值模拟相位屏的方法主要有 Zernike 多项式法和功率谱反演法等, 本文采用计算速度较快的功率谱反演法产生符合 Kolmogorov 谱的随机相位屏, 对上行信道的大气湍流进行模拟.

2 功率谱反演法产生相位屏

2.1 功率谱反演法产生相位屏

功率谱反演法产生相位屏的基本思想是通过生成一复数高斯随机数值矩阵 $a(m', n')$, 然后用符合 Kolmogorov 大气相位扰动的功率谱 $\Phi_n(k)$ 对其进行滤波, 再进行逆傅里叶变换得到湍流相位屏 $\phi(m, n)$ [7,8],

$$\phi(m, n) = \sum_{m'} \sum_{n'} n' a(m', n') \sqrt{\Phi_\phi(m', n')} \times \exp \left[i2\pi \left(\frac{mm'}{N_x} + \frac{nn'}{N_y} \right) \right], \quad (1)$$

其中相位屏的大气湍流折射率功率谱密度为

$$\Phi_\phi(\kappa, z) = 0.033 C_n^2(z) \kappa^{-11/3}. \quad (2)$$

在获得大气湍流折射率功率谱密度 $\Phi_n(k)$ 时, 需要已知大气湍流折射率结构常数 $C_n^2(h)$, 或者大气湍流相干长度 r_0 , 两者之间存在关系如下:

$$r_0 = 0.185 \left[\frac{\lambda^2}{\int_z^{z+\delta z} C_n^2(\xi) d\xi} \right]. \quad (3)$$

用 (2), (3) 式可联立求得由 r_0 表示的功率谱密度 $\Phi_n(k)$ 为

$$\Phi_\phi(\kappa, z) = 0.490 r_0^{-5/3} \kappa^{-11/3}. \quad (4)$$

往往为了便于计算, 将波数域函数转变到空间频率域, 空间波数 k 与空间频率的关系为 $k = 2\pi f$, 最后可得到

$$\begin{aligned} \phi(m, n) &= \sum_{m'} \sum_{n'} a(m', n') f(m', n') \\ &\times \exp \left[i2\pi \left(\frac{mm'}{N_x} + \frac{nn'}{N_y} \right) \right], \\ f(m', n') &= \frac{2\pi}{L_x L_y} \sqrt{0.00058 r_0^{-5/6}} \\ &\times (f_x^2 + f_y^2)^{-11/12}. \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 次谐波补偿

由 FFT 谱反演法产生随机相位屏的方法比较简单, 方便, 但也有不足之处. 这种方法产生的相位屏的最小空间频率为 $f_{\min} = \Delta f = 1/L$, 最大空间频率为 $f_{\max} = N\Delta f/2 = 1/(2\Delta x)$, Δf 为空间频率间隔, L 为相位屏的尺寸, N 为取样点数, Δx 为取样间隔, 相位屏不包含 $(-\Delta f_x/2, \Delta f_x/2)$ 和 $(-\Delta f_y/2, \Delta f_y/2)$ 这部分低频率分量对应的功率谱, 从而使相位的大尺度起伏产生误差. 因此为了精确模拟符合大气湍流统计特征的湍流相位屏, 有必要对根据 FFT 谱反演法产生的相位屏进行低频补偿.

一般来说, 补偿低频的方法有两种 [9], 一是首先产生一个很大的相位屏, 然后从中心抽取一小部分, 这一小部分中包含了低频成分的特征. 这样就需要很大的矩形或方形相位屏, 另一种方法是沿用 Noll 理论添加 Zernike 多项式, 但是 Zernike 多项式体现的是整个口径的相位而不是采样点的相位. 近年来, 对相位屏低频补偿的次谐波方法引起了人们的广泛关注 [10]. 一个次谐波是一个周期比相位屏尺寸大几倍的正弦波. 次谐波低频补偿的基本思想是在傅里叶低频次谐波重采样的基础上, 对 FFT

法模拟的相位屏进行插值拟合,从而改善相位屏的低频统计特性.

低频次谐波补偿法是将傅里叶谱高频端开始取样部分 $(0, -f_{\min})$ 分为 9 个等份,原理详见图 3,每部分为原先面积大小的 1/9,取样点分布在外面的 8 个小区上,形成次谐波网格. p 级次谐波 ($p \geq 1$) 对应的采样间隔为 $\Delta f_p = f_{\min}/3^p$,这样原先的一个部分就被 3^{2p} 各部分取代,因此,要加一个权重因子 3^{-2p} ,整个表达式为

$$\phi_{SH}(m, n) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{m'=-1}^1 \sum_{n'=-1}^1 a(m', n') f(m', n') \times \exp \left[i2\pi 3^{-p} \left(\frac{mm'}{N} + \frac{nn'}{N} \right) \right], \quad (6)$$

$$f(m', n') = C \cdot 3^{-2p} r_0^{-5/6} (f_{lx}^2 + f_{ly}^2),$$

$$f_{lx} = 3^{-p} m' \Delta f_x,$$

$$f_{ly} = 3^{-p} n' \Delta f_y.$$

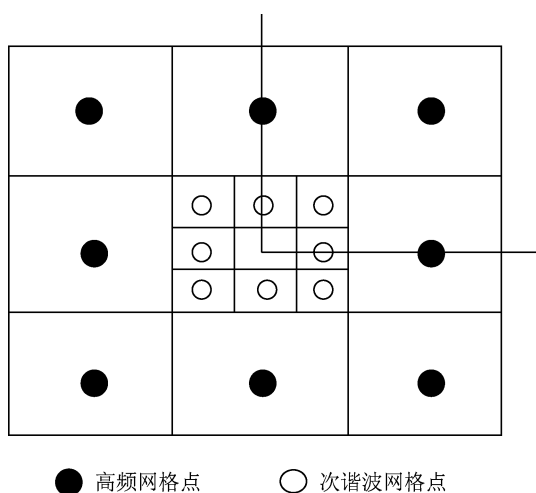


图 3 低频次谐波补偿原理图

在波长为 6.328×10^{-7} m, 相位屏大小为 200×200 , 采样点间隔为 0.003 m, 相位屏间距为 500 m 的参数选取条件下实现了用谱反演法模拟 Kolmogonov 谱相位屏. 图 4(a) 为湍流相干长度 $r_0 = 0.107$ m, 口径 $D = 0.6$ m 时用谱反演法产生 Kolmogonov 相位屏的典型图; 从图 4(a) 可以看到, 未加次谐波时相位屏的低频成分 (倾斜) 不明显, 这是由于 FFT 谱反演法所固有的局限性造成的低频不足现象.

图 4(b) 为在图 4(a) 相位屏基础上叠加 4 级次谐波得到的相位屏; 从图 4(b) 可以看到, 叠加次谐

波后相位屏的低频 0 成分 (倾斜) 已经比较明显, 这表明叠加低频次谐波的确能有效补偿 FFT 谱反演法造成的低频不足.

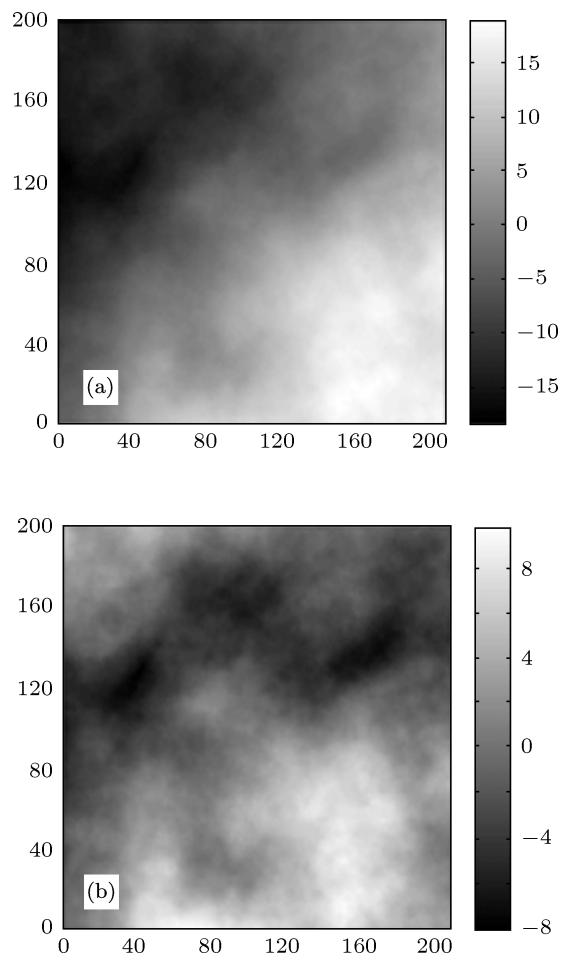


图 4 功率谱反演法模拟 Kolmogonov 谱相位屏 (a) 未加次谐波时相位屏; (b) 加 4 级次谐波时相位屏

3 几种常见的大气湍流模型

大气湍流相干长度 r_0 , 是反映了相位屏模拟大气湍流强度的重要参数, 作为评定湍流是否影响光学成像系统的图像分辨力的主要依据, 与 $Cn^2(h)$ 的高度分布密切相关, 也就是说采用不同的 $Cn^2(h)$ 模型可以模拟大气湍流的不同情况.

目前最为常见的是 Hufnagel-valley, SLC-Day, Greenwood 等大气湍流模型. 其中 Hufnagel-valley 大气湍流模型, 分为强湍流模型 HV21 和弱湍流模型 Modified HV21. HV21 主要用于白天大气湍流较强时, Modified HV21 则是常用的夜晚模型.

强湍流模型 HV21 为

$$Cn^2(h) = 5.94 \times 10^{-53} (21/27)^2 h^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + 1.7 \times 10^{-14} \exp(-h/100). \quad (7)$$

弱湍流模型 Modified HV21 为

$$Cn^2(h) = 8.16 \times 10^{-54} h^{10} \exp(-h/1000)$$

$$+ 3.02 \times 10^{-17} \exp(-h/1500) + 1.9 \times 10^{-15} \exp(-h/100). \quad (8)$$

还有就是 SLC-Day 大气湍流模型, 此模型不仅在 3500 m 高度后与 Hufnagel-valley 经典模型相似, 而且较其他模型详细列出了高度在 3000 m 以下时大气湍流折射率结构常数 $Cn^2(h)$ 的变化. SLC-Day 大气湍流模型 $Cn^2(h)$ 分布为

$$Cn^2(h) = \begin{cases} 0 & 0 \text{ m} < h < 19 \text{ m}, \\ 4.008 \times 10^{-13} h^{-1.054} & 19 \text{ m} < h < 230 \text{ m}, \\ 1.300 \times h^{-15} & 230 \text{ m} < h < 850 \text{ m}, \\ 6.352 \times 10^{-7} h^{-2.966} & 850 \text{ m} < h < 7000 \text{ m}, \\ 6.209 \times 10^{-16} h^{-0.6229} & 7000 \text{ m} < h < 20000 \text{ m}. \end{cases} \quad (9)$$

湍流谱 $\Phi_n(k)$ 有很多种模型, 如 Kolmogorov 谱、Tatarskii 谱、Hill 谱、Green-Tarazano 谱、Frehlich 谱、Von Karman 谱等. 这些谱是根据各类不同参数条件下实际大气湍流或实验室模拟湍流的实验测量数据统计处理和理论分析的需要得到的. 其中有些湍流谱仅适用于描述一定环境下的大气湍流的起伏规律, 有些湍流谱是因为理论分析的需要由精确谱简化而得到的近似谱. 有些湍流谱尽管比较精确但无法用于理论分析, 当然这是因为大气湍流本身非常复杂. 这些谱中我们采用目前公认的修正后的 Von Karman 谱. 即

$$\Phi_n(k) = 0.033 C_n^2 \frac{\exp(-k^2/k_m^2)}{(k^2 + k_0^2)^{11/6}}, \quad (10)$$

式中, $Cn^2(h)$ 是大气湍流折射率结构常数; k 是空间波数; $k_0 < k < k_m$, $k_m = 5.92/l_0$, $k_0 = 1/L_0$, 其中 l_0 和 L_0 分别为湍流的内尺度和外尺度, 湍流的外尺度 L_0 一般为观测点的高度, 湍流内尺度 l_0 一般为 1—10 mm.

由此, 我们综合了 HV21, MHV21, SLC-Day 几种常见的大气湍流模型, 分别选择 Kolmogorov 功率谱函数和 Compensated Von karman 功率谱函数, 采用功率谱反演法, 结合了次谐波补偿机理, 以 500 m 作为一个相位屏路径段, 模拟了 0—20 km 路径段的总相位屏, 其三维网格图和二维相位幅度图见图 5—10. 在同样 HV21, MHV21 或者 SLC-Day 中某一模型下, 这些图各不相同, 比如在 HV21 下, 即使只有功率谱函数发生变化, 这些图也彼此

不同, 这是因为在数值模拟大气湍流时, 引入了随机复数函数, 这更好的仿真了大气中湍流多变的情况, 有利于后续的空间目标干涉成像仿真要求.

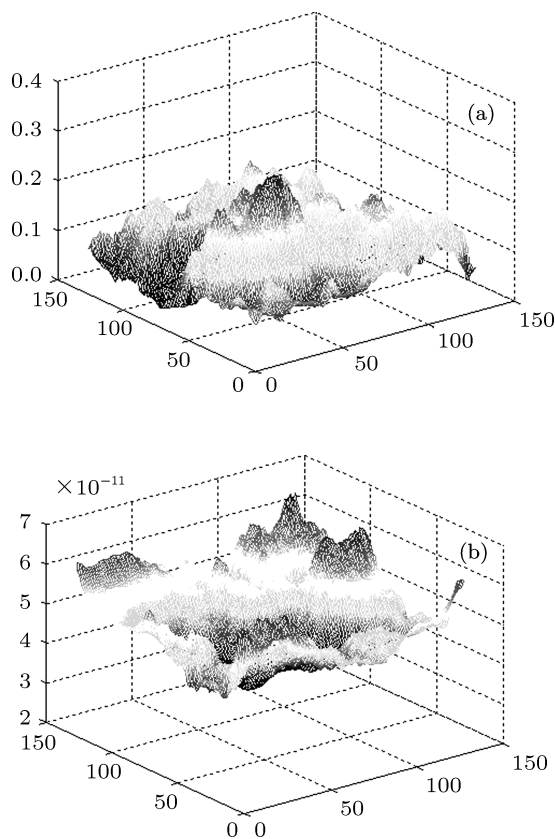


图 5 0—20 km HV21 湍流模型 Kolmogorov 和 Compensated Von karman 功率谱时三维相位网格图 (a) Kolmogorov 功率谱函数; (b) Compensated Von karman 功率谱

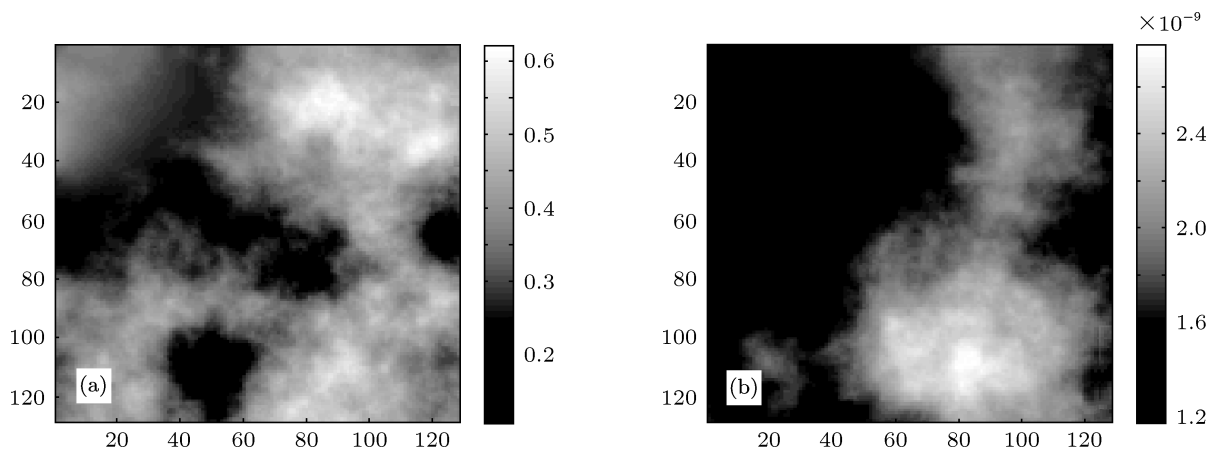


图 6 0—20 km HV21 湍流模型 Kolmogorov 和 Compensated Von karman 功率谱时二维相位幅度图 (a) Kolmogorov 功率谱函数; (b) Compensated Von karman 功率谱

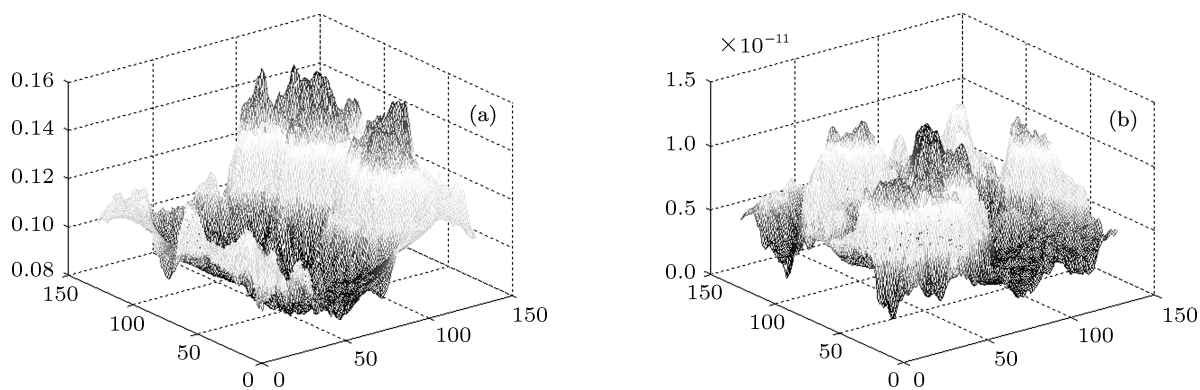


图 7 0—20 km MHV21 湍流模型 Kolmogorov 和 Compensated Von karman 功率谱时三维相位网格图 (a) Kolmogorov 功率谱函数; (b) Compensated Von karman 功率谱

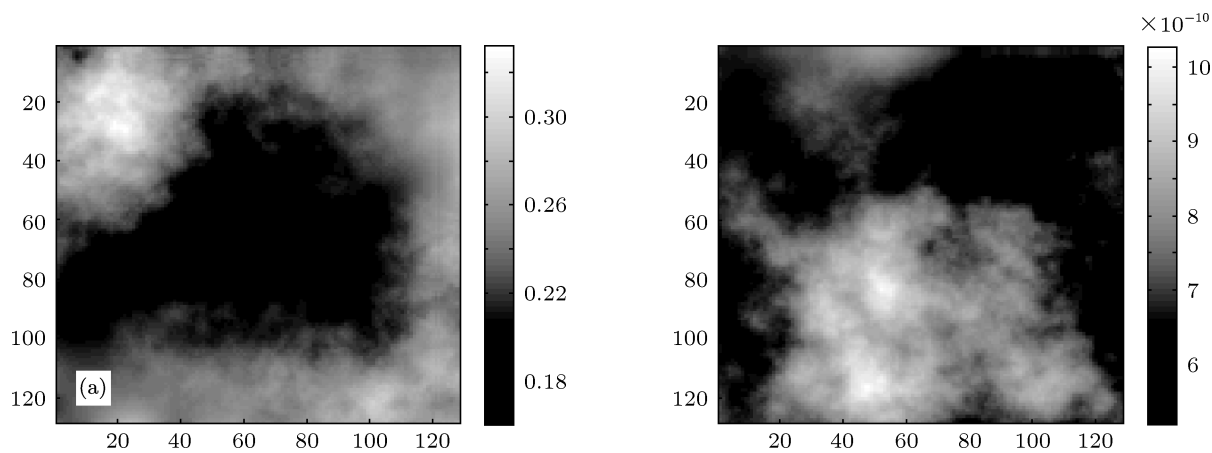


图 8 0—20 km MHV21 湍流模型 Kolmogorov 和 Compensated Von karman 功率谱时二维相位幅度图 (a) Kolmogorov 功率谱函数; (b) Compensated Von karman 功率谱

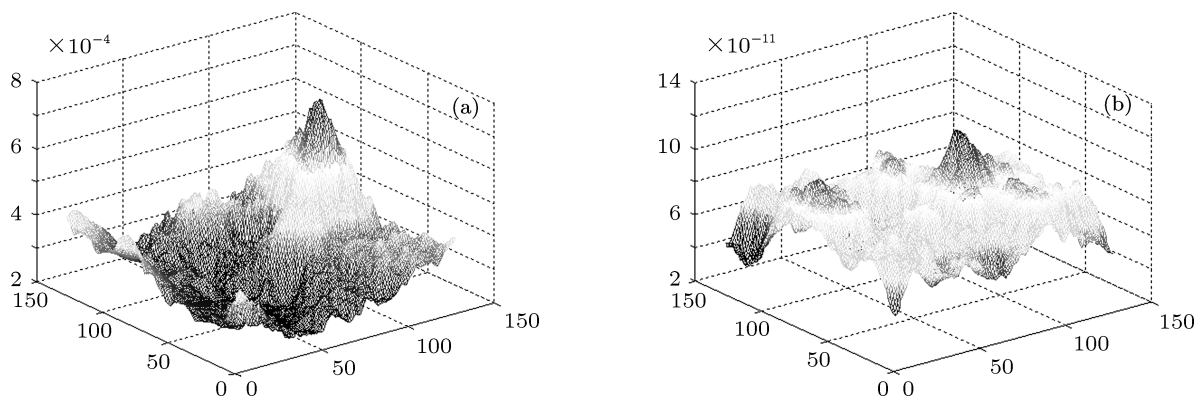


图9 0—20 km SLC-Day 湍流模型 Kolmogorov 和 Compensated Von karman 功率谱时三维相位网格 (a) Kolmogorov 功率谱函数; (b) Compensated Von karman 功率谱

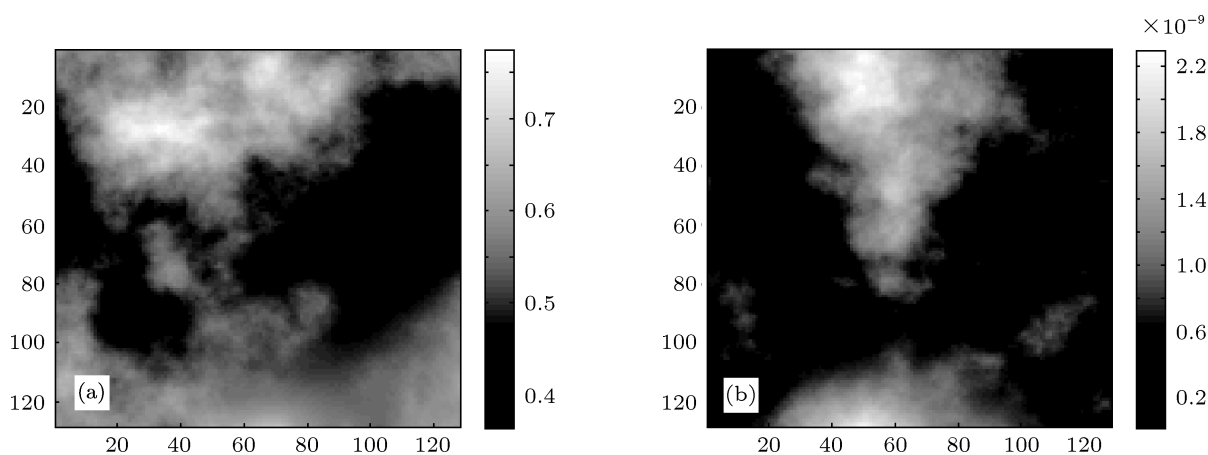


图10 0—20 km SLC-Day 湍流模型 Kolmogorov 和 Compensated Von karman 功率谱时二维相位幅度图 (a) Kolmogorov 功率谱函数; (b) Compensated Von karman 功率谱

4 几种常见的大气湍流模型下的目标重建结果

数值模拟 32×64 结构的 T 形等间距天线空间目标重建过程, 忽略天顶角影响, 采用高斯光束斜程传输, 波长 6.328×10^{-7} m, 相位屏大小为 200×200 , 采样点间隔为 0.05 m, 相位屏间距为 500 m 的参数选取条件^[11-13], 使用功率谱反演法模拟在不同大气模型中上行信道大气扰动作用对目标干涉成像效果影响, 仿真目标采用干涉条纹的黑白相间靶标局部图. 重建结果比较详见表 1 和图 11—14.

图像重建质量的评价参数采用斯托列尔 (Strehl) 准则, Strehl 值是两图像强度分布互相关谱的归一化结果, 如公式所示, 当重建图像强度分布 $I(f)$ 与目标图像强度分布 $O(f)$ 相同,

即 $I(f) = O(f)$ 时, Strehl 值为 1, 也就是说, Strehl 值越靠近 1, 说明重建图像与目标图像越相似, 则系统的成像质量越好.

$$\text{Strehl} = \frac{\left| \iint O^*(f)O(f)df_xdf_y \right|^2}{\iint O^*(f)O(f)df_xdf_y \iint I^*(f)I(f)df_xdf_y} \quad (11)$$

结果表明, Kolmogonov 统计规律和修正后的 Von karmen 统计规律下模拟的大气湍流相位屏对空间目标重建图像总的来说, 都是可以接受的图像质量, 这是因为相位闭合作用^[1]的结果. 两者具体比较分析, Von karmen 功率谱下要普遍好于 Kolmogonov 功率谱, Von karmen 功率谱不论是 HV21 模型, 还是 Modified HV21、或在 SLC-Day 大气模

型中, 绝大部份重建像 Strehl 比值等于 1, 这表示经闭合相位处理, 重建图像完全不会受湍流扰动影响. 但 Kolmogonov 功率谱下 HV21, Modified HV21 模型或者 SLC-Day 模型中绝大部分重建图像 Strehl 比值大于 0.9, 少数部分重建图像 Strehl 比值在 0.6 范围. 以上计算结果显示, 采用闭合相位技术, 大气湍流对空间目标干涉成像系统的成像质量影响在可接受范围内, 重建图像具有识别能力.



图 11 目标原始图

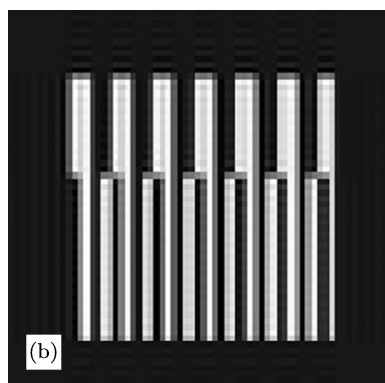
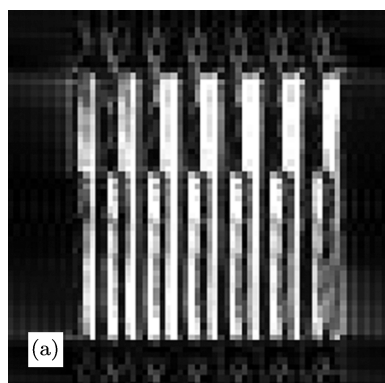


图 12 HV21 大气湍流模型 Kolmogorov 和 Compensated Von karman 功率谱时目标重建图 (a) Kolmogorov 功率谱函数; (b) Compensated Von karman 功率谱

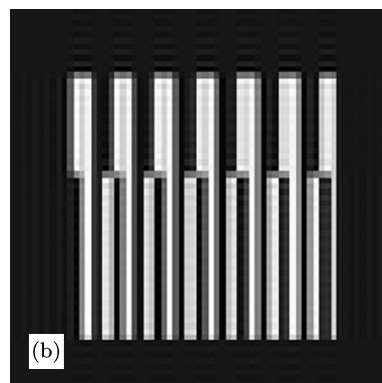
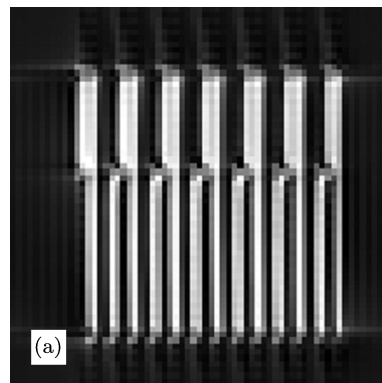


图 13 MHV21 大气湍流模型 Kolmogorov 和 Compensated Von karman 功率谱时目标重建图 (a) Kolmogorov 功率谱函数; (b) Compensated Von karman 功率谱

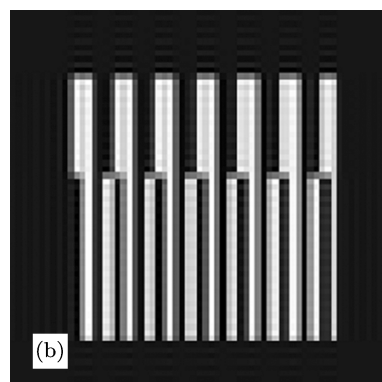
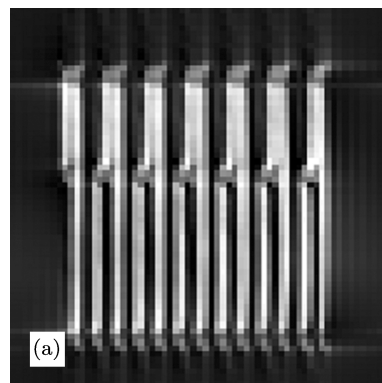


图 14 SLC-Day 大气湍流模型 Kolmogorov 和 Compensated Von karman 功率谱时目标重建图 (a) Kolmogorov 功率谱函数; (b) Compensated Von karman 功率谱

相位闭合技术^[1]顾名思义采用多个光学天线闭合后,消除各自的相位误差,为达到闭合的作用,需要三个或三个以上的光学天线进行计算.3个回波信号形成一个闭合相位(Triplet),我们通过

求其比值消除其中的相位差.相位闭合技术作为光学综合孔径成像中消除大气扰动的关键技术,在空间目标干涉成像技术中也得到很好的改进与运用.

表1 大气湍流模型下的目标几种常见的重建图像 Strehl 结果

大气湍流模型	Kolmogorov 功率谱函数	Compensated Von karman 功率谱函数
HV21	Strehl = 0.5556	Strehl = 1
MHV21	Strehl = 0.4805	Strehl = 1
SLC	Strehl = 0.0506	Strehl = 1

5 分析与结论

数值模拟 32×64 结构的 T 型等间距天线空间目标重建过程,忽略天顶角影响,采用高斯光束斜程传输,波长 6.328×10^{-7} m,相位屏大小为 200×200 ,采样点间隔为 0.05 m,相位屏间距为 500 m 的参数选取条件下,使用功率谱反演法模拟在不同大气模型中上行信道大气扰动作用.重建结果比较详见表 1.结果表明:Kolmogonov 统计规律和修正后的 Von karmen 统计规律下模拟的大气湍流相位屏对空间目标重建图像相比较,总的来说都是可以接受的图像质量,这是因为相位闭合作用的结果.两者从客观 Strehl 数值上具体比较,Von karmen 功率谱下要普遍好于 Kolmogonov 功率谱,Von karmen 功率谱不论是 HV21 模型,还是 Modified HV21、或在 SLC-Day 大气模型中,绝大部分重建像 Strehl 比值等于 1,这表示经闭合相位处理,重建图像完全不会受湍流扰

动影响.但 Kolmogonov 功率谱下 HV21, Modified HV21 模型或者 SLC-Day 模型中大部分重建图像 Strehl 比值大于 0.9,少数部分重建图像 Strehl 比值在 0.6 范围.以上计算结果显示,采用闭合相位技术,大气湍流对空间目标干涉成像系统的成像质量影响在可接受范围内,重建图像具有识别能力.

更进一步分析 Strehl 数值差异原因为,空间目标干涉成像技术中相位闭合算法虽然能够消除两光束的光程差,但不能消除干涉条纹扭曲带来的影响.即光束在大气湍流扰动下,波前随机的相位误差分布若处处近似相等,此时两光束的干涉光斑出现类似整体漂移的现象,这样的误差能够在相位闭合中消除.但若波前相位误差处处不等时,即干涉条纹出现扭曲,相位闭合算法无法有效消除湍流影响.可以设想若将空间目标干涉成像技术运用于对低空目标的观测,干涉条纹受到强湍流扰动后对成像质量的影响将不可忽视.

- [1] Holmes R B, Ma S, Bhowmik A, Greninger C 1996 *J. Opt. Soc. Am.* **13** 351
- [2] Bai X, Zhang C M, Jing C Y, Guan X W, Cao F, Li Y N, Xie L L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 070703 (in Chinese) [白鑫, 张淳民, 景春元, 关小伟, 曹芬, 李艳娜, 谢林利 2011 物理学报 **60** 070703]
- [3] Kendrick R L 2006 *Appl. Phys.* **45** 4235
- [4] Campbell B F, Rubin L, Holmes R B 1995 *Appl. Opt.* **34** 5932
- [5] Jin X L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 692 (in Chinese) [季小玲 2010 物理学报 **59** 692]
- [6] Wei H Y, Wu Z S, Peng H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6666 (in Chinese) [韦宏艳, 吴振森, 彭辉 2008 物理学报 **57** 6666]
- [7] Fleck J A, Morris J R 1976 *Appl. Phys.* **10** 129
- [8] He W U, Wu J 2008 *Proc. SPIE* **6832** 1
- [9] Zhang H M, Li X Y 2006 *Opto-Electronic Engineering* **33** 14 (in Chinese) [张慧敏, 李新阳 2006 光电工程 **33** 14]
- [10] Yan H X 2000 *Appl. Opt.* **39** 3023
- [11] Lü Q B, Xiang L B, Xue B, Zhou J S 2005 *Acta Phys. Sin.* **34** 1336 (in Chinese) [吕群波, 相里斌, 薛彬, 周锦松 2005 光子学报 **34** 1336]
- [12] Lü Q B, Yuan Y, Xiang L B 2008 *Acta Phys. Sin.* **37** 573 (in Chinese) [吕群波, 袁艳, 相里斌 2008 光子学报 **37** 573]
- [13] Xiang L B, Yuan Y, Lü Q B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5400 (in Chinese) [相里斌, 袁艳, 吕群波 2009 物理学报 **58** 5400]

Simulation for space target interference imaging system distorted by atmospheric turbulence*

Liu Yang-Yang[†] Lü Qun-Bo Zhang Wen-Xi

(Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

(Received 24 August 2011; revised manuscript received 10 October 2011)

Abstract

Interference imaging system for space target has close relation with atmospheric environment, and atmospheric turbulence disturbance distorts terribly the wavefront phase of any transmission optics launched from any optics system. In the space target interference imaging system the phase-closure-principle is adopted, in order to eliminate possible effects of atmospheric turbulence on the target image. Based on the power spectrum method and the Fourier transform method, the numerical simulation of wavefront phase screen, which is distorted by atmospheric turbulence conforming to the statistical rules of kolmogonov model and modified Von Karmen model, is respectively implemented. Various images by several different phase-screen models on the interference imaging system are obtained. Simulation results show that, with the advantage of adopting phase-closure-principle, the possible effects of atmospheric turbulence imaging can be eliminated basically.

Keywords: interference imaging, atmospheric turbulence, power spectrum inversion, wave-front phase screen

PACS: 42.25.Bs, 42.25.Hz, 42.30.-d

* Project supported by the Major Project of Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. 090202B01Y).

[†] E-mail: liuyangyang@aoe.ac.cn