

基于功率谱的高精度大气湍流相位屏的快速模拟

张智露, 蔡冬梅, 贾鹏, 韦宏艳

太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

摘要 分析了基于非均匀采样功率谱反演大气湍流相位屏的算法, 该算法可进行并行处理, 并引入图形处理单元 (GPU), 在不影响模拟精度的前提下有效提高了相位屏的模拟速度。利用 Kolmogorov 功率谱, 基于 GPU 技术生成大气湍流相位屏; 对相位屏的模拟精度、模拟速度和误差进行统计分析, 并与理论值进行比较。结果表明利用 GPU 技术模拟的大气湍流相位屏与理论值非常吻合, 具有很高的模拟速度和精度, 大幅提高了大气湍流相位屏的生成速度。

关键词 大气光学; 大气湍流相位屏; 功率谱; 非均匀采样; 图形处理单元

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.020101

Fast Simulation for High Precision Atmospheric Turbulence Phase Screen Based on Power Spectrum

Zhang Zhilu, Cai Dongmei, Jia Peng, Wei Hongyan

College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract An algorithm of inverting atmospheric turbulence phase screen based on non-uniform sampling power spectrum is analyzed. Parallel progressing can be realized in the algorithm, and a graphics processing unit (GPU) is introduced. The speed of phase screen simulation can be effectively improved without affecting the simulation precision. Atmospheric turbulence phase screen is generated based on GPU technique while the Kolmogorov power spectrum is used. The simulation accuracy, simulation speed and error of phase screen are statistically analyzed and compared with theoretical values. Results show that the atmospheric turbulence phase screen simulated by GPU technique is consistent with the theoretical value, and has high simulation speed and high simulation precision. The generation speed of atmospheric turbulence phase screen is greatly improved.

Key words atmospheric optics; atmospheric turbulence phase screen; power spectrum; non-uniform sampling; graphics processing unit

OCIS codes 010.1290; 010.1300; 010.1330

1 引言

对大气湍流随机过程的数值模拟, 是研究大气湍流效应对光传输性能影响的重要手段, 广泛应用于天文成像观测、大气激光通信、卫星遥感和自适应光学等领域^[1-4]。现有的数值模拟方法中, 大气湍流功率谱反演随机相位屏的方法具有不受功率谱模型限制、计算速度快的优点, 但模拟得到的相位屏低频成分严重不足且具有空间周期性。采用均匀采样叠加次谐波补偿的方式可以对湍流相位屏低频部分进行补偿, 但补偿之后的低频部分仍然存在较大误差^[5-7]。

收稿日期: 2016-09-19; **收到修改稿日期:** 2016-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(11503018)

作者简介: 张智露(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事计算机模拟及光学信息处理方面的研究。

E-mail: zuotongren@outlook.com

导师简介: 蔡冬梅(1974—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事液晶自适应光学技术及微机电系统波前矫正器方面的研究。E-mail: dm_cai@163.com(通信联系人)

根据大气湍流功率谱在频域上的非线性分布,采用非等间隔采样将大气湍流相位分布表示为不同频率谐波分量的有限叠加,并通过直接求和运算得到大气湍流相位屏^[5]。模拟相位屏的统计结果与理论值非常吻合,且无空间周期性;但直接求和模拟相位屏的算法运算量较大,利用主频为 2.4 GHz 的中央处理器(CPU)模拟一帧 256×256 格点的随机相位屏需要 655 s,运算速度慢,不具有实用性,无法满足随机相位屏动态模拟的需求。非均匀快速傅里叶变换(NUFFT)算法可以有效提高相位屏的模拟速度,但该算法得到的模拟结果存在一定的误差^[8-9],尤其当采样点较少时,采样点几乎都集中在低频段,NUFFT 算法的插值处理使模拟相位屏在高频区域的误差增大。因此,非均匀采样功率谱反演高精度大气湍流相位屏需解决直接求和算法计算量大、运算时间长的问题。

利用直接求和算法模拟大气湍流相位屏,该算法中包含并行运算,利用图形处理单元(GPU)技术可加速并行运算。GPU 通用计算技术具备很强的并行计算能力和浮点运算能力,例如 NVIDIA 公司的 Tesla K40 拥有 15 个流多处理器(SM),每个 SM 常驻线程可达 2048,运算速度为 CPU 的 100 倍以上^[10]。

本文将 GPU 技术引入非均匀采样功率谱反演大气湍流相位屏的数值模拟中,利用其强大的并行运算能力,提高了直接求和算法的计算速度,实现了大气湍流相位屏的高精度、快速模拟。采用 Kolmogorov 功率谱,对大气湍流相位屏进行仿真,分析了非均匀采样功率谱反演大气湍流相位屏的性能。数值模拟了不同湍流强度的随机相位屏并进行统计分析,从相位结构函数、Zernike 系数方差及相位结构函数的相对误差 3 个方面讨论了相位屏的模拟性能与湍流强度、采样点以及相位屏格点数目关系。仿真分析了 GPU 技术对相位屏模拟速度的提高能力,并与 CPU 的模拟速度进行比较,验证了 GPU 技术在相位屏快速、高精度模拟计算中应用的可行性。

2 原 理

2.1 大气湍流相位屏数值模拟原理

在二维条件下,大气湍流的随机相位可以表示为

$$\varphi(x, y) = \sum_{n=-N+1}^N \sum_{m=-N+1}^N \Phi_k(f_{xm}, f_{yn}) \mathbf{h}(f_{xm}, f_{yn}) \exp[j2\pi(xf_{xm} + yf_{yn})], \quad (1)$$

式中 N 为相位屏网格数, m, n 分别为 x, y 方向的采样点数目, f_{xm}, f_{yn} 为采样点数列, $\mathbf{h}(f_{xm}, f_{yn})$ 为复高斯随机数矩阵, $\Phi_k(f_{xm}, f_{yn})$ 为大气湍流的离散功率谱密度函数。(1)式表明大气湍流相位随机过程可以看作是复振幅为 $\Phi_k(f_{xm}, f_{yn}) \mathbf{h}(f_{xm}, f_{yn})$ 、频率为 (f_{xm}, f_{yn}) 的有限谐波分量的叠加^[11]。

大气湍流的功率谱密度在频域上为非线性分布,湍流能量主要集中在低频部分,且低频部分的功率谱密度曲线变化极快。根据大气湍流功率谱的分布特征,将采样点压缩至低频部分,对功率谱进行非均匀采样,大气湍流的功率谱密度可表示为

$$\Phi_k(f_{xm}, f_{yn}) = \Phi_k(f_x, f_y) \delta(f_x - f_{xm}) \delta(f_y - f_{yn})$$

$$C_x = \frac{f_{x(m+1)}}{f_{x(m)}}, C_y = \frac{f_{y(n+1)}}{f_{y(n)}} \quad (2)$$

式中 $\Phi_k(f_x, f_y)$ 为大气湍流的连续功率谱密度函数, C_x, C_y 为恒定常数, $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数。复振幅满足

$$E [|\Phi_k(f_{xm}, f_{yn}) \mathbf{h}(f_{xm}, f_{yn})|^2] = \Phi_k(f_{xm}, f_{yn}) \Delta f_{xm} \Delta f_{yn}$$

$$\Delta f_{xi} \neq \Delta f_{xj}, \Delta f_{yi} \neq \Delta f_{yj} \quad (3)$$

式中 $\Delta f_{xm}, \Delta f_{yn}$ 为非均匀采样频率间隔。

非均匀采样的单边频率区间为 $[f_{\min}, f_{\max}]$, f_{\max} 可表示为

$$f_{\max} = \frac{N}{2L} \quad (4)$$

式中 L 为相位屏的物理尺寸。Kolmogorov 谱的功率谱密度在低频部分变化很快,在零频处趋于无穷大^[5],在不引入过多直流分量的情况下应尽可能减小采样基频。Kolmogorov 谱的非均匀采样基频 f_{\min} 为均匀采样最小空间频率的 10^{-3} ,即

$$f_{\min} = \frac{1}{L} \times 10^{-3} \quad (5)$$

由(2)~(5)式可得到非均匀采样频率,非均匀采样点在湍流功率谱上的对数分布如图 1 所示。将(2)~(5)式代入(1)式,发现大气湍流相位屏的数值模拟是一个相互独立的四重循环的求和计算,该模拟算法的运算量大,计算时间长,因此需要提高模拟算法的计算速度。

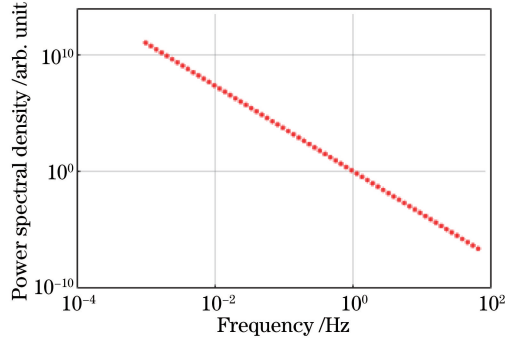


图 1 非均匀采样点在湍流功率谱上的对数分布

Fig. 1 Logarithmic distribution of non-uniform sampling points in turbulence power spectrum

2.2 相位屏模拟并行运算的 GPU 实现

定义模拟相位屏的格点数目为 $M \times N$, 根据(1)式,模拟一帧相位屏的运算量为 $M \times N \times m \times n$, 其中相位屏上任意一个格点 p 的计算都是一个二重循环的求和运算,任意两次运算互相独立,且任意两个格点间的运算也是互相独立的,因此上述运算完全可以并行处理。

将(1)式中的复振幅项 $\Phi_k(f_{xm}, f_{yn}) \mathbf{h}(f_{xm}, f_{yn})$ 表示为矩阵 \mathbf{F} , 即

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 c_{ij} 为矩阵 \mathbf{F} 的元素。将(1)式中的 $\exp[j2\pi(xf_{xm} + yf_{yn})]$ 表示为矩阵 \mathbf{W} , 其每一个元素为 w_{ij} , 则对于相位屏的任意格点 p , 有

$$\mathbf{W}_p = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1m} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nm} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

将 \mathbf{F} 、 \mathbf{W} 分别一维化,分别记为 $\mathbf{F}(\cdot)$ 、 $\mathbf{W}(\cdot)$, 则

$$\mathbf{F}(\cdot) = [c_{11} \quad c_{12} \quad \cdots \quad c_{1n} \quad \cdots \quad c_{m1} \quad c_{m2} \quad \cdots \quad c_{mn}], \quad (8)$$

$$\mathbf{W}(\cdot)_p = [w_{11} \quad w_{12} \quad \cdots \quad w_{1m} \quad \cdots \quad w_{n1} \quad w_{n2} \quad \cdots \quad w_{nm}]^T. \quad (9)$$

将相位屏所有格点对应的傅里叶系数矩阵表示为矩阵 \mathbf{V} , 即

$$\mathbf{V} = [\mathbf{W}(\cdot)_{11} \quad \mathbf{W}(\cdot)_{12} \quad \cdots \quad \mathbf{W}(\cdot)_{ij} \quad \cdots \quad \mathbf{W}(\cdot)_{NM}]. \quad (10)$$

(1)式可以表示为

$$\boldsymbol{\varphi}(\cdot) = \mathbf{F}(\cdot)\mathbf{V}, \quad (11)$$

式中 $\boldsymbol{\varphi}(\cdot)$ 为 $1 \times MN$ 矩阵。模拟一帧相位屏,若 $M = N = m = n = 128$, 计算量为 128^4 。对 $\boldsymbol{\varphi}(\cdot)$ 进行分块处理:

$$\boldsymbol{\varphi}(\cdot) = [\boldsymbol{\varphi}_{\text{sub}1} \quad \boldsymbol{\varphi}_{\text{sub}2} \quad \cdots \quad \boldsymbol{\varphi}_{\text{sub}j} \quad \cdots], \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_{\text{sub}} = \mathbf{F}(\cdot)\mathbf{V}_{\text{sub}}, \quad (13)$$

式中 $\boldsymbol{\varphi}_{\text{sub}j}$ ($j=1, 2, \dots$)、 \mathbf{V}_{sub} 为部分矩阵。

相位屏模拟矩阵分块示意图如图 2 所示。从矩阵 \mathbf{V} 的第 1 列开始,每 M 列为一个相关单元,设定 $\boldsymbol{\varphi}_{\text{sub}}$ 的列数为 M , 则单次 GPU 的计算量为 $M \times m \times n$, 矩阵的分块直接影响并行算法的速度。计算统一设备架构设定每个 block 的 thread 最大值,且每个 block 的 thread 值应尽可能取 warp 块大小的倍数。warp 为最

小单指令多线程单元,其包含的 thread 值固定为 $32^{[11-12]}$ 。这里采用的 Tesla K40 每个 block 的 thread 最大值为 1024,则每个 block 中的 thread 值应设为 32 的倍数且不超过 1024。根据功率谱在 x 方向的采样点数目 m ,每个 block 的 thread 值设为 $(\lceil m/32 \rceil + 1) \times 32$,当 m 的值不是 32 的倍数时,对超过 m 值的 thread 值执行一次空操作。每个 block 的有效 thread 值为 m ,则需要 $M \times n$ 个 block,对 block 的划分不影响计算速度。此处设定 grid 值为 $\langle M, n \rangle$,即在 x, y 方向上分别分配 n, M 个 block。

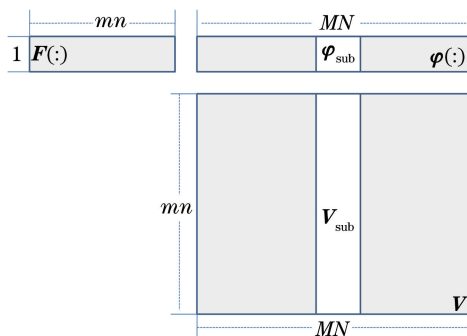


图 2 相位屏模拟中矩阵分块示意图

Fig. 2 Diagram of matrix blocks in phase screen simulation

GPU 与显存之间的存储带宽有限,为使 GPU 高效地工作,应尽可能减小数据存储带来的延时。模拟中 CPU 传递给 GPU 端的数据包括 2 种,一种数据为采样点数据,属于 double 类型实数,数据大小为 $8m$ bit ($m = n$) 或 $8(m + n)$ bit ($m \neq n$),若 m, n 不超过 512,则数据大小不超过 8 kB,而 GPU 给常量内存留有 64 kB 的空间,可将其保存在常量内存中以节省数据读取的时间消耗,从而加速程序运行;另一种数据为功率谱与高斯矩阵相乘后的 double 类型复数,数据大小为 $8 \times 2mn$ bit,当 $m = n = 512$ 时,数据大小为 4096 kB,远超过 64 kB,可保存在显存中。此外,模拟中每个 thread 产生一个中间值,则每个 block 产生 m 个中间值,将 m 个中间值相加得到一个最终值,将这个最终值存放在显存中,最后回传给 CPU。将暂存中间值的数组定义为共享内存,可以大大缩短数据读存的时间,并实现块内线程之间的通信协作。

3 仿真实验与分析

将 Kolmogorov 谱作为大气湍流功率谱模型,利用(1)~(5)式模拟生成大气湍流相位屏。仿真条件为:相位屏长度 $L = 1$ m,大气相干长度 $r_0 = 0.1$ m,采样点数 $m = n = 128$,相位屏格点数目 $M = N = 128$ 。取同一复振幅矩阵 F ,基于 CPU、GPU 生成的 Kolmogorov 湍流随机相位屏如图 3 所示。计算得到图 3(a)、(b) 相减的残差为 0,说明在相同的随机数矩阵和采样条件下,基于 CPU、GPU 模拟得到的相位屏完全相同。

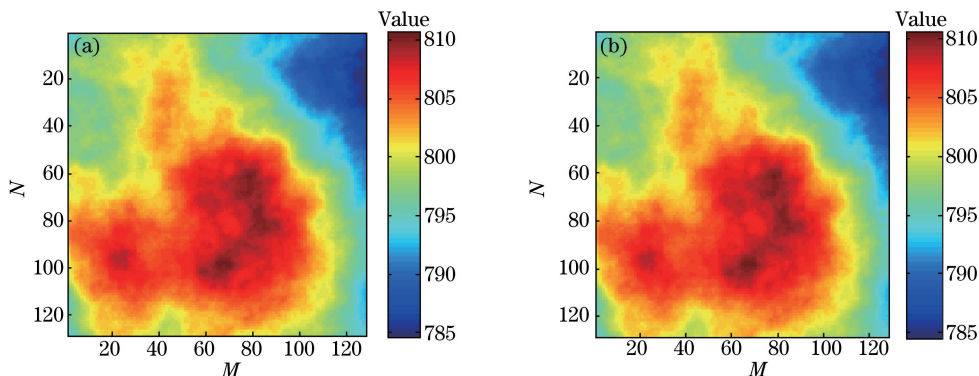


图 3 基于(a) CPU 和(b) GPU 生成的 Kolmogorov 湍流随机相位屏

Fig. 3 Kolmogorov turbulence random phase screens generated based on (a) CPU and (b) GPU

分析湍流功率谱的离散采样对大气湍流相位屏模拟的影响,设 f_{n-1}, f_n, f_{n+1} 为采样点,频带 (f_{n-1}, f_{n+1}) 对应的湍流能量理论值 $E_T(f_n)$ 可表示为

$$E_T(f_n) = \int_{f_{n-1}}^{f_{n+1}} [\Phi(f)]^{1/2} df, \quad (14)$$

式中 $\Phi(f)$ 为一维功率谱密度函数。离散采样后频带 (f_{n-1}, f_{n+1}) 对应的湍流能量 $E_{DT}(f_n)$ 可表示为

$$E_{DT}(f_n) = [\Phi(f_n)]^{1/2} (f_{n+1} - f_{n-1}). \quad (15)$$

定义湍流功率采样误差函数为

$$\delta_{TS}(f_n) = \frac{E_T(f_n) - E_{DT}(f_n)}{N_S/f_n}, \quad (16)$$

式中 N_S 为采样点数目。当 $N_S = 128$ 时, 计算均匀采样和非均匀采样的误差, 并在均匀采样基础上计算 8 阶次谐波补偿的采样误差(此时有效采样点数目为 144), 如图 4 所示。由图 4 可知, 均匀采样模式下生成的湍流相位屏的低频成分严重不足。对均匀采样进行次谐波补偿后, 采样频域范围可扩展至低频区, 从而弥补了均匀采样在低频区采样不足的缺陷; 但是均匀采样误差远大于非均匀采样误差, 这是因为非均匀采样将大部分采样点压缩在低频区, 而次谐波补偿方法在低频区的采样点数目远小于非均匀采样点数目。在频率区间 $(-1, 1)$ 内, 非均匀采样点的数目为 83, 而次谐波补偿的采样点数目仅为 17。

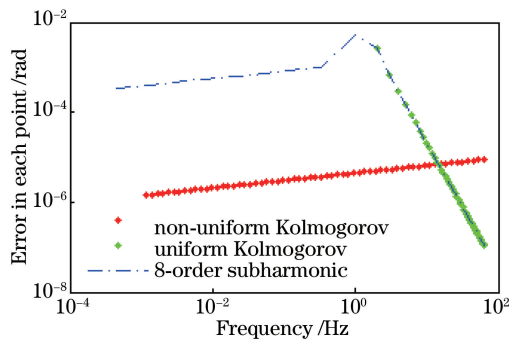


图 4 不同采样模式下的误差曲线

Fig. 4 Error curves under different sampling modes

定量分析基于 GPU 的非均匀采样功率谱反演生成的大气湍流相位屏, 并与使用均匀采样加次谐波补偿的方法及理论值进行比较。保持其他仿真条件不变, 模拟大气相干长度 $r_0 = 0.1$ m 时的大气湍流相位屏, 得到 500 帧随机相位屏, 计算大气湍流相位屏的相位结构函数的统计平均值, 结果如图 5 所示。图中大气湍流相位结构函数的理论曲线满足

$$D_{\text{theory}}(r) = 6.88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (17)$$

式中 r 为空间任意两点之间的距离。

图 5 中利用非均匀采样模拟得到的大气湍流相位屏的相位结构函数统计结果与理论值在低、中、高频段都非常吻合; 使用均匀采样方法加谐波补偿得到的大气湍流相位屏在高频部分与理论值非常吻合, 在低频部

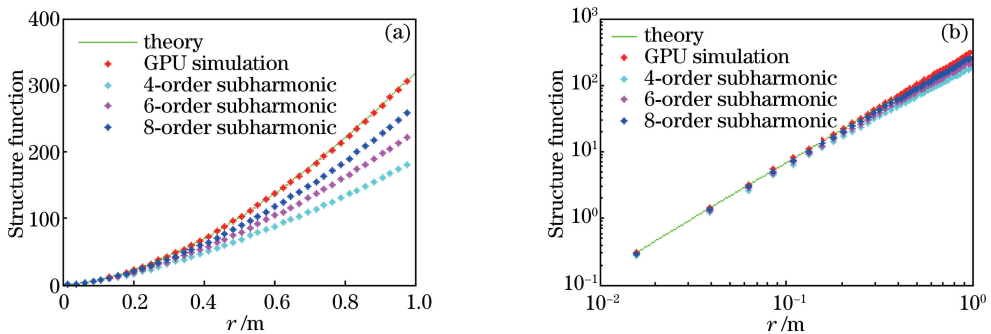


图 5 大气湍流相位屏的相位结构函数统计值与理论值的比较。(a)线性图;(b)对数图

Fig. 5 Comparison of statistical value with theoretical value of phase structure function of atmospheric turbulence phase screen. (a) Linear chart; (b) logarithmic chart

分随着补偿谐波阶次的增加逐渐逼近理论值,但相较于非均匀采样方法仍有较大的差别,且随着次谐波阶数的增加,计算量逐渐增大。

定义相位结构函数的相对误差为

$$R_e(r) = \frac{D_{\text{sim}}(r) - D_{\text{theory}}(r)}{D_{\text{theory}}(r)} \times 100\%, \quad (18)$$

式中 $D_{\text{sim}}(r)$ 为模拟相位屏的结构函数统计值, $D_{\text{theory}}(r)$ 为相位结构函数理论值。

保持其他仿真条件不变,利用非均匀采样和次谐波补偿方法分别生成 500 幅随机相位屏,计算模拟相位屏的相对误差,分析相位屏在不同频段上的模拟性能,结果如图 6 所示。由图 6 可知,非均匀采样方法得到的模拟相位屏误差远小于次谐波补偿方法。随着谐波阶数的增加,次谐波补偿方法生成相位屏的模拟误差减小,但整体误差依然很大。计算相位差结构函数误差的绝对平均值,非均匀采样下相位差结构函数误差的绝对平均值为 0.45%, 8, 6, 4 阶次谐波补偿下相位差结构函数误差的绝对平均值分别为 11.2%、20.0%、31.2%。

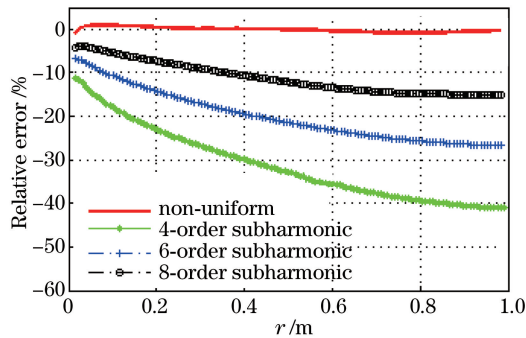


图 6 不同采样模式下大气湍流相位屏的相位结构函数理论值与模拟值的相对误差

Fig. 6 Relative error between theoretical value and simulation value of phase structure function of atmospheric turbulence phase screen under different sampling modes

对 GPU 模拟生成的相位屏在直径为 1 m 的圆域内进行 Zernike 多项式分解,分解为 105 项(去掉 Piston 项),计算各项 Zernike 模式系数方差,并与理论值进行比较,结果如图 7 所示,其中 Kolmogorov 湍流情况下各阶 Zernike 模式系数方差的理论值为

$$\langle a_j^2 \rangle = \frac{2.246(n+1)\Gamma(n-5/6)}{[\Gamma(17/6)]^2 \Gamma(n+23/6)} \left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/3}, \quad (19)$$

式中 n 为 Zernike 多项式的径向频率, D 为相位屏尺寸, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。

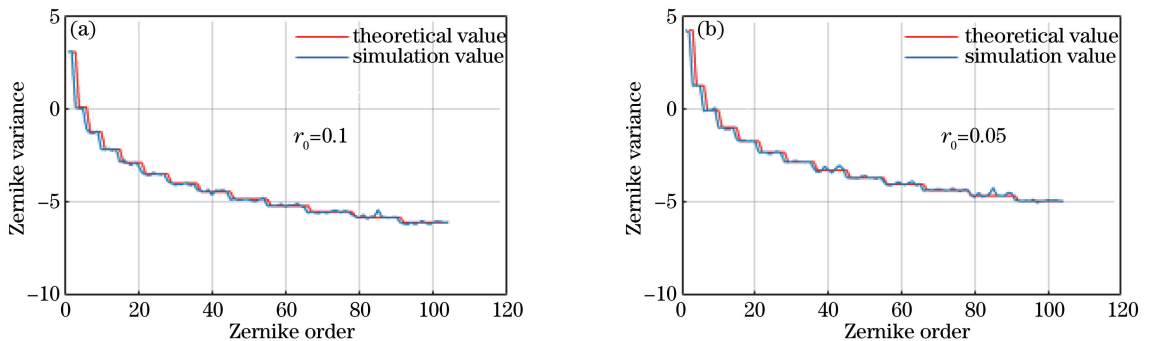


图 7 大气湍流相位屏各阶 Zernike 模式方差理论值与模拟值比较。 (a) $r_0=0.1$; (b) $r_0=0.05$

Fig. 7 Comparison of theoretical value simulation value of Zernike model variance of each order of atmospheric turbulence phase screen. (a) $r_0=0.1$; (b) $r_0=0.05$

分析不同湍流强度下使用非均匀采样方法产生的相位屏,在其他仿真条件不变的前提下, r_0 取 0.1, 0.05, 0.025 m 时分别生成 500 幅随机相位屏,计算不同频段上的相对误差,结果如图 8 所示。 r_0 取 0.1, 0.05, 0.025 m 时得到的相对误差分别为 0.45%、1.66%、2.57%。结果表明,相位屏的模拟误差随湍流强度的增大而略有增大,且模拟误差主要体现在低频部分,通过调整采样频域范围或增大采样点密度可减小这部分误差。

降低采样点数目可进一步减小运算量、提高计算速度。仿真条件为:相位屏长度 $L=1$ m, 格点数目 $M=N=128$, 大气相干长度 $r_0=0.1$ m。当采样点数目分别为 64×64 、 128×128 时分别, 仿真生成 500 幅大气湍流相位屏, 计算其相位结构函数的相对误差曲线, 如图 9 所示, 可以看出, 减少采样点数目可使模拟误差增大, 误差的增大主要出现在采样稀疏的高频区域, 但相位屏的整体模拟性能仍然较好, 采样点数目为 64×64 、 128×128 时对应的相对误差绝对值平均分别为 1.41%、0.45%。

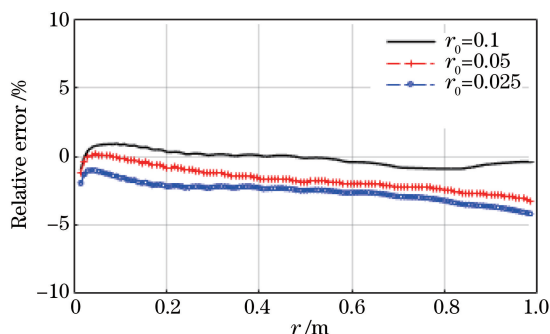


图 8 不同 r_0 下大气湍流相位屏的相位结构函数理论值与模拟值的相对误差

Fig. 8 Relative error between theoretical value and simulation value of phase structure function of atmospheric turbulence phase screen with different r_0

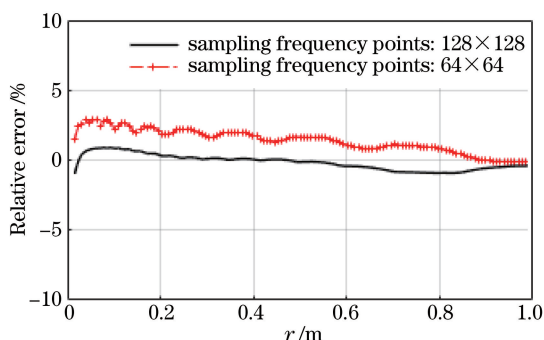


图 9 不同采样点下相位结构函数理论值与模拟值的相对误差

Fig. 9 Relative error between theoretical value and simulation value of phase structure function with different sampling points

为了分析大气湍流相位屏性能对激光传输模拟的影响, 采用均匀采样法、叠加次谐波补偿法和非均匀采样法分别生成 600 幅相位屏, 将高斯光束作为传输光束进行数值模拟。在单幅相位屏下模拟得到的像是破碎的, 不能直接反映光的实际作用效果。根据光传输理论, 将点目标在短曝光情形下形成的像通过多帧图像平均即可得到长曝光情形下形成的像^[13-15]。对由 600 幅相位屏得到的 600 帧像取平均, 得到长曝光像。模拟参数为: 波长为 $1.55 \mu\text{m}$, 高斯光束束腰半径为 30 mm, 相干长度为 0.1 m, 相位屏网格数为 128×128 。模拟像中一个方向中轴线上的光强分布, 如图 10 所示。由光传输实验中局域光强的增强现象可知, 当湍流很弱时, 湍流对光束质量并不一定总是起着破坏作用^[15]。由图 10 可知, 使用均匀采样方法得到的相位屏的中低频成分严重不足, 这部分低频成分可以看作是一个弱湍流, 传输得到的长曝光像衰减严重, 甚至不再满足高斯分布。对均匀采样方法得到的相位屏叠加次谐波补偿可以有效弥补低频成分不足的问题。使用非均匀采样方法得到的相位屏的低频更为充足, 且在各个频段上的相位屏和理论值更吻合, 长曝光得到的像衰减更小。

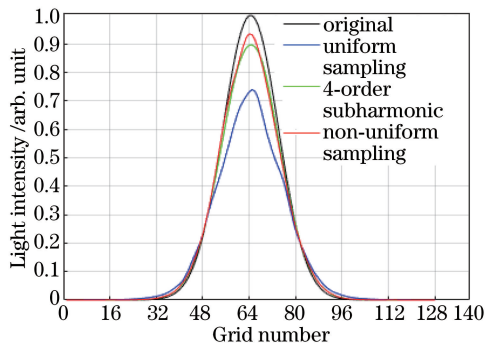


图 10 长曝光情形下的光强分布

Fig. 10 Distribution of light intensity under long exposure situation

4 相位屏模拟的加速比

数值模拟采用的 CPU 为 Intel 公司生产的 E5-2620 V3 处理器, 该处理器主频为 2.4 GHz, 三级缓存为 15 MB。GPU 为 NVIDIA 公司生产的 Tesla K40, 具有 12 GB 显存, 时钟频率为 7.45×10^5 Hz。程序代码均在 Visual Studio 2010 中使用微软基础类库框架编写, 数据精度为 double 类型。

定义数值模拟大气湍流相位屏的加速比为

$$\alpha = \frac{T_{\text{cpu}}}{T_{\text{gpu}}}, \quad (20)$$

式中 T_{cpu} 为 CPU 下生成随机相位屏的时间, T_{gpu} 为 GPU 下生成相同相位屏的时间。在不同的采样点数目下模拟不同格点总数的相位屏, 并计算其加速比, 结果如表 1 所示。

表 1 单帧相位屏模拟的加速比

Table 1 Speed-up ratio of single frame phase screen simulation

Grid number	64×64		128×128		256×256	
	32×32	64×64	64×64	128×128	128×128	256×256
Sampling frequency point	32×32	64×64	64×64	128×128	128×128	256×256
T_{cpu}/s	0.7	2.7	10	41	164	655
T_{gpu}/s	0.09	0.09	0.37	0.7	3	10
α	7.8	30	27	59	54	66

表 1 中, 对于不同网格点的相位屏模拟, GPU 技术都实现了较高的加速比, 加速比最高可以达到 66, 可见 GPU 技术可以有效提高相位屏的模拟速度。从模拟时间看, 当采样点为 64×64 时, 模拟一帧格点 128×128 的相位屏只需要 0.37 s, 实现了相位屏的快速模拟, 同时保持了较高的模拟性能。

5 结 论

对大气湍流功率谱采用非均匀采样并进行数值模拟, 得到的大气湍流相位屏在低、中、高频段都具有很好的模拟精度, 但该过程计算量大、运算速度慢。本文对非均匀采样功率谱反演大气湍流相位屏的算法进行并行处理, 用 GPU 实现并行运算, 极大提高了相位屏的计算速度, 实现了大气湍流相位屏的快速模拟。仿真分析了大气湍流相位屏的模拟性能与湍流强度、采样点数目之间的关系以及模拟相位屏的误差在频域上的分布特征。将均匀采样方法与均匀采样加次谐波补偿的方法进行比较。结果表明, 采用均匀采样方法生成的大气湍流相位屏在低频部分的值与理论值相比有很大误差, 增加次谐波补偿阶数可以对相位屏的低频部分进行补偿, 但相较于非均匀采样方法仍有较大误差, 且随着次谐波阶数的增加, 计算量逐渐变大。对不同方式生成的相位屏对光传输影响的分析发现, 利用非均匀采样方法生成的相位屏对光束的正透镜效果更明显。基于 GPU 技术, 相位屏的模拟精度可以达到 CPU 的计算精度, 实现了大气湍流相位屏的快速、高精度模拟, 且对光传输具有积极影响。

参 考 文 献

- [1] Mcglamery B L. Restoration of turbulence-degraded images[J]. Journal of the Optical Society of America, 1967, 57(3): 293-296.
- [2] Frehlich R. Simulation of laser propagation in turbulent atmosphere[J]. Applied Optics, 2000, 39(3): 393-397.
- [3] Wang Rui, Wang Tingfeng, Sun Tao. Simulation model of laser atmospheric transmission characteristics using arbitrary thickness random phase screen[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0813001.
王 锐, 王挺峰, 孙 涛. 任意厚度随机相位屏激光大气传输特性仿真模型[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0813001.
- [4] Wang Hongxing, Wu Xiaojun, Song Bo. Modeling and analysis of beam wander in maritime atmospheric turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0213001.
王红星, 吴晓军, 宋 博. 海上大气湍流中光束漂移模型分析[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0213001.
- [5] Cai Dongmei, Wang Kun, Jia Peng, *et al.* Sampling methods of power spectral density method simulating atmospheric turbulence phase screen[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(10): 227-232.
蔡冬梅, 王 昆, 贾 鹏, 等. 功率谱反演大气湍流随机相位屏采样方法的研究[J]. 物理学报, 2014, 63(10): 227-232.
- [6] Hua Zhili, Li Hongping. Atmospheric turbulence phase screen simulation based on random unit expansion[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0501001.
华志励, 李洪平. 基于随机数据元扩张的大气湍流相位屏数值模拟[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0501001.
- [7] Wu Hanling, Yan Haixing, Li Xinyang, *et al.* Generation of rectangular turbulence phase screens based on fractal

- characteristics of distorted wave front[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 114-119.
- 吴晗玲, 严海星, 李新阳, 等. 基于畸变相位波前分形特征产生矩形湍流相位[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 114-119.
- [8] Xiang Jingsong. High-frequency error compensation method for the fast Fourier transform-based turbulent phase screen [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1001003.
- 向劲松. 快速傅里叶变换湍流相位屏高频误差的补偿方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1001003.
- [9] Cai Dongmei, Ti Peipei, Jia Peng, *et al.* Fast simulation of atmospheric turbulence phase screen based on non-uniform sampling[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 248-254.
- 蔡冬梅, 迺培培, 贾鹏, 等. 非均匀采样的功率谱反演大气湍流相位屏的快速模拟[J]. *物理学报*, 2015, 64(22): 248-254.
- [10] Cook S. *CUDA programming: A developer's guide to parallel computing with GPUs*[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2012.
- [11] Zhang Huimin, Li Xinyang. Numerical simulation of wave front phase screen distorted by atmospheric turbulence[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(1): 14-19.
- 张慧敏, 李新阳. 大气湍流畸变相位屏的数值模拟方法研究[J]. *光电工程*, 2006, 33(1): 14-19.
- [12] Ni Xiaolong, Liu zhi, Kong Yue, *et al.* Parallel implementation of liquid crystal atmosphere turbulence simulator wave front generation based on GPU[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(3): 61-65.
- 倪小龙, 刘智, 孔悦, 等. 基于GPU的液晶大气湍流模拟器波面生成的并行实现[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(3): 61-65.
- [13] Liu Jun, Wu Pengli, Gao Ming. Wander and spreading of polarized and partially coherent laser propagation in slant path in turbulence atmospheric[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1013001.
- 刘钧, 吴鹏利, 高明. 偏振部分相干激光斜程湍流大气传输的漂移扩散[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1013001.
- [14] Qiao Chunhong, Fan Chengyu, Huang Yinbo, *et al.* Scaling laws of high energy laser propagation through atmosphere [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(2): 433-437.
- 乔春红, 范承玉, 黄印博, 等. 高能激光大气传输的定标规律[J]. *中国激光*, 2010, 37(2): 433-437.
- [15] Rao Ruizhong, Wang Shipeng, Liu Xiaochun. Atmospheric-turbulence-degraded light intensity images size measurement and description of deformation characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(4): 451-456.
- 饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春. 被湍流大气退化的激光光斑: 尺度测量与形变特征描述[J]. *光学学报*, 1998, 18(4): 451-456.