

湍流信道的红外鬼成像

蒋思凡, 项 澜, 高秀敏

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2023年3月31日; 录用日期: 2023年5月19日; 发布日期: 2023年5月26日

摘 要

研究了一种可以在湍流信道下自适应成像的鬼成像系统。系统利用可以模拟强起伏和弱起伏湍流的 Gamma-Gamma 分布来模拟湍流, 虽然鬼成像可以在湍流下进行成像, 但是大多数研究没有研究不同波长激光和采样率在不同湍流下的成像。本研究在采用不同波长的激光的基础上, 测试不同的采样率在不同强弱湍流下的性能, 并且通过闪烁指数计算了大气折射率结构常数。通过峰值信噪比和误比特率评价成像质量, 得到不同模型的成像规律, 为进一步的自适应鬼成像算法提供了新的模型。

关键词

鬼成像, 大气湍流, 折射率结构常数, 光传播

Infrared Ghost Imaging of Turbulent Channel

Sifan Jiang, Lan Xiang, Xiumin Gao

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 31st, 2023; accepted: May 19th, 2023; published: May 26th, 2023

Abstract

We investigate a ghost imaging system that can image adaptively under turbulent channels. The system utilizes a Gamma-Gamma distribution that can simulate strong and weak undulating turbulence to simulate the turbulence, and ghost imaging can be imaged under turbulence, but most studies do not study the imaging of different wavelength laser under different turbulence, and do not combine with the sampling rate. In this research, we test the performance of different sampling rates under different strengths of turbulence based on the use of different wavelengths of the laser. Finally, we calculate the refractive index structure constant by scintillation index. The

imaging quality is evaluated by PSNR and BER, and the imaging law of different models is obtained, which provides a new model for further adaptive ghost imaging algorithms.

Keywords

Ghost Imaging, Atmospheric Turbulence, Refractive Index Structure Constant, Light Propagation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

鬼成像是一种通过相关计算恢复目标图像的单像素成像技术, 1994 年, Klyshko 在研究纠缠光子特性时指出, 纠缠光子对实现非定域性成像具有重要的意义[1]。1995 年, Pittman 等[2]首次根据 Klyshko 的理论完成了在不包含物体的光路上获得待测物体像的实验, 证实了量子鬼成像的非定域性。在经典鬼成像装置中, 使用了两束相关的激光束: 一束照射物体, 然后由单像素桶式探测器测量, 另一束传输到 CCD 探测器。通过对两个信号进行关联计算可以还原出原始图像。在 2008 年, Shapiro [3]提出了一种单光路计算 GI (CGI)方案, 计算鬼成像大大简化了光路, 更多的研究人员对鬼成像开展了研究, 通过改变成像模型极大的优化了计算鬼成像的成像质量[4]-[9]。

与传统的成像方法相比, 鬼成像将检测和成像分为两个单独的部分进行。这使得鬼成像可以具有一定的抵抗光路干扰的特性。一些理论研究[10] [11] [12] [13] [14]表明, 在大气湍流的环境下进行成像, 可以使成像效果比传统成像的方式更好, 但是依然会受到光路的干扰, 影响成像质量。

因此研究人员针对湍流信道下的鬼成像方案进行了研究, 参考文献[15]研究了自适应光学系统中不同自适应镜的数量对成像质量的影响。参考文献[16]中讨论了单静态湍流和双静态湍流对鬼像的能见度和质量的影响。参考文献[12]研究了大气对双狭缝鬼成像的影响。参考文献[13]计算了湍流对粗糙表面目标的鬼影成像的空间分辨率、图像对比度和信噪比。参考文献[17]研究了湍流信道下的鬼成像方案, 研究了湍流的增强对鬼成像效果的影响。提升鬼成像成像效果的研究也有很多, 参考文献[18]提出了一个利用等离子体结构照明显微镜的鬼成像系统, 实现了超分辨率成像。参考文献[19]将鬼成像图像与混合神经网络进行训练, 可以使经过重建分辨率的鬼成像图片能够超过衍射极限。参考文献[20]将 Radon 变换得到的数字图像进行投影, 通过调整投影的角度和间隔, 提升了计算鬼成像的精度并且提高了鬼成像加密方案的鲁棒性。然而上述文件很少研究通过判断湍流强弱, 来进行图像优化的自适应的关联成像。并且上述文献很少研究不同波长的激光对湍流中关联成像的优劣, 以及湍流中不同采样率的关联成像的成像质量和时间。研究这两者可以在较短的时间和较少的资源损耗下进行良好地成像。

为了分析湍流对自由空间光通信系统的影响, 研究人员提出了多种湍流信道模型, 包括对数正态分布、Gamma 分布、Gamma-Gamma 分布、K 分布、负指数分布、Weibull 分布、指数 Weibull 分布等。在弱湍流条件下, 可以采用玻恩近似和 Rytov 近似等摄动方法。除此之外其他常用的方法是扩展惠更斯-菲涅耳原理和抛物方程方法, 后两种方法分别适用于弱湍流和强湍流条件。

在上述模型中, Gamma-Gamma 强度-波动模型具有可以适应从弱到强的广泛的湍流条件的优点, 所以在分析传输系统的误码时应用最为广泛。在成像过程中, 由单像素桶式探测器测量的强度值和 CCD 探测器信号进行关联计算可以计算恢复出图像。因此, 湍流强度波动与成像结果直接相关。可以采用

Gamma-Gamma 强度 - 波动模型模拟强弱湍流分析 CGI 系统的峰值信噪比和误比特率性能。

本文提出一种自适应湍流信道的红外鬼成像, 论文通过仿真建立了包含大气湍流的压缩感知计算鬼成像模型, 得到了不同强度的大气湍流引起的模糊图像。该方法的基本思想是通过桶探测器接受信号光束, 计算获得大气湍流闪烁指数, 通过选用不同波段高斯激光, 利用长波光束具有更多的能量和更高的透射率的优势, 调整不同采样率, 以达到在节省资源的情况下, 尽可能获得不错的峰值信噪比及误比特率性能。

本文的其余部分分为三个部分: CSCGI 理论和大气湍流通道理论分别在第二节进行阐述。然后, 讨论了在大气湍流通道下 CSCGI 方案以及通过探测器测量闪烁指数大小的方案。因此, 在第三节中, 模拟了 PSNR 和误比特率, 以衡量提出的方案的性能。PSNR 和误比特率性能由折射率结构参数 C_n^2 、传输距离 d 和采样率 N 决定。最后, 对全文进行了总结。

2. 理论分析和方案描述

2.1. 压缩感知计算鬼成像理论

大气折射率结构常数 C_n^2 是光学湍流强度的定量描述, 是作为反应大气湍流的最重要的参数之一。文章利用大气湍流导致的光强起伏效应来测量路径中的 C_n^2 强度。

计算鬼成像相比经典鬼成像而言, 简化了一条参考光路, 大大简化了实验操作难度和成像所需要的空间资源。实验中由 DMD 加载实验需要的随机强度的矩阵, 激光结果 DMD 的调制后, 穿过待成像的物体, 得到的总光强由不具有空间分辨能力的桶探测器接收, 通过关联计算还原出图像。计算鬼成像的原理图如图 1 所示:

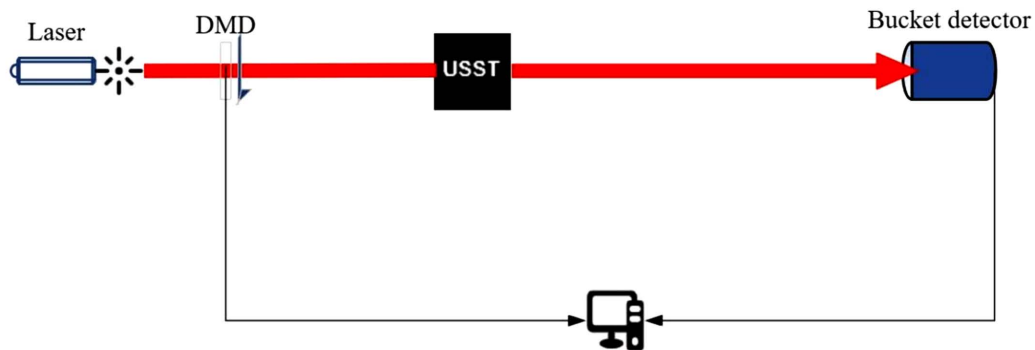


Figure 1. Calculate ghost imaging flow chart

图 1. 计算鬼成像流程图

在关联成像过程中, 调制矩阵 $\phi_i(x, y)$ 被加载到 DMD 上, 激光从激光发射机发出, 经过 DMD 的调制, 照射在待成像物体 $D(x, y)$ 上。通过物体的光被桶探测器接收, 桶探测器接收到信号为光强总强度 I_i , 如式(1)所示。经过 z 次采样后, 将调制矩阵信息和桶探测器信号进行关联运算, 恢复出目标图像。关联计算公式 CGIC 如式(2)表示:

$$I_i = \int \phi_i(x, y) \times D(x, y) dx dy \quad (1)$$

$$C_{CGI}(x, y) = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z (I_i - \langle I \rangle) \phi_i(x, y) \quad (2)$$

式中 $\langle I \rangle$ 为光强的平均值, N 为样本个数。

为了提高重建图像的质量，本文添加了压缩感知技术作为优化数据计算的算法。压缩感知需要的数据远远少于奈奎斯特-香农标准认为必要的数据采集数量，使用很少的采集点却可以完整还原出原始信息。将压缩感知与鬼成像相结合，可以有效减少样本数量，提升存储效率，并提高图像重建质量。

压缩感知公式如式(3)所示：

$$y = \Phi x \quad (3)$$

式中 x 为长度 N 的一维信号，也就是原信号，稀疏度为 k 。 Φ 为观测矩阵，对应着亚采样这一过程。它将高维信号 x 投影到低维空间，是已知的。 y 为长度 M 的一维测量值，也就是亚采样后的结果。显然它也是已知的。

因此，压缩感知问题就是在已知测量值 y 和测量矩阵 Φ 的基础上，通过求解 $y = \Phi x$ 得到原信号 x 。然而自然中的大部分的信号 x 并不稀疏，因此需要对原始信号 x 进行稀疏处理，令 $x = \Psi s$ ， Ψ 为稀疏基矩阵， s 为稀疏系数。于是压缩感知方程可以展开成式(4)所示：

$$y = \Phi \Psi s \quad (4)$$

系统最后通过桶探测器接收的信号判断当前大气湍流的强弱，根据不同强弱的大气湍流采用不同的方案。系统在计算出大气湍流的情况下，根据已知的距离，采用初步适合的方案，在每一次的成像后通过 PSNR 和 BER 判断成像质量，根据低质量的成像，逐步提高系统的采样率及激光波长，达到最好的成像质量。在缩短时间并且节约资源的情况下，进行自适应的红外鬼成像。

2.2. 大气湍流通道模型理论

高空光束的传输由于大气的压力和温度受到风等因素的影响，发射端和接收端之间由于悬浮粒子等自然状况的影响，导致激光发射出去的信号在接收端发生失调，引起接收信号的强烈波动，并增加误比特率，也会影响关联成像在大气湍流中的性能。

由于计算鬼成像模型只用一个桶探测器接收透射过物体的光强总强度，而不用关注信号传输过程中的每个像素点信息。因此论文采用光场分布模型来作为大气湍流模型，其中选用 Gamma-Gamma 分布模型可以很好的模拟从强到弱的湍流，具有普遍性。

Gamma-Gamma 分布如下(5) (6)式所示[21]：

$$p(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\alpha+\beta/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\alpha+\beta/2-1} K_{\alpha-\beta} \left[2(\alpha\beta I)^{1/2} \right], \quad I > 0 \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{\sigma_x^2} \cong \left\{ \exp \left[\frac{0.49\sigma_1^2}{(1+1.11\sigma_1^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{1}{\sigma_y^2} \cong \left\{ \exp \left[\frac{0.51\sigma_1^2}{(1+0.69\sigma_1^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}$$

式中， $\sigma_1^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ ， C_n^2 为折射率结构参数，利用 C_n^2 测量大气折射率波动程度，显示随高度和风速的变化而变化。在 ITU (国际电信联盟) 的 R H-V 模型中， $C_n^2(h)$ 与高度 h 的关系如(7)式所述[22]：

$$C_n^2(h) = 8.148 \times 10^{-56} v_{RMS}^2 h^{10} e^{-h/1000} + 2.7 \times 10^{-16} e^{-h/1500} + C_n^2 e^{-h/100} \quad (7)$$

本文研究了水平路径上的传输，因此 C_n^2 实际上是恒定的。不同湍流状态下的 C_n^2 值如下：

$C_n^2 = 10^{-17} m^{-2/3}$ 为弱湍流;
 $C_n^2 = 10^{-15} m^{-2/3}$ 为中湍流;
 $C_n^2 = 10^{-13} m^{-2/3}$ 为强湍流。

2.3. 基于 Gamma-Gamma 湍流信道的压缩感知计算鬼影成像传输系统方案

图 2 中所示为添加 Gamma-Gamma 湍流模型的压缩感知计算鬼影成像示意图。激光从激光发射器发出后, 经过 DMD 的调制矩阵 ϕ_i 调制, 调制过的激光透过对象 $O(x, y)$ 后, 经过湍流模型 $\varphi_i(x, y)$ 的干扰, 最后桶探测器接收到激光信号光强。经过关联计算后, 得出成像结果。基于 Gamma-Gamma 湍流通道模型 (GG-CSCGI) 的压缩感知计算鬼影成像传输如图所示。

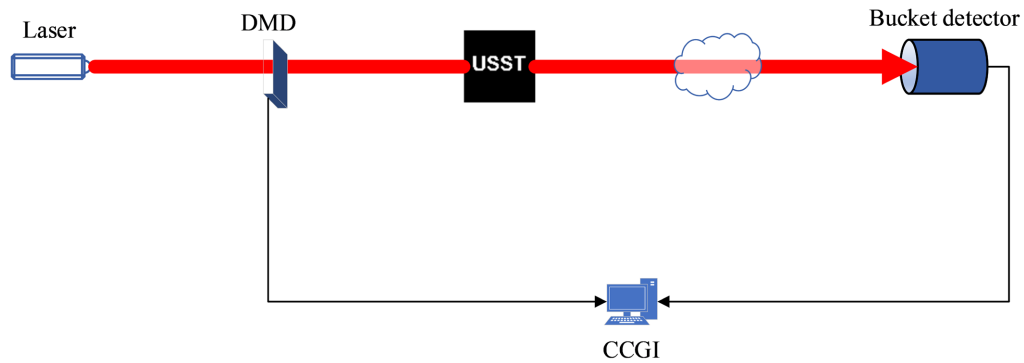


Figure 2. Schematic diagram of ghost imaging under atmospheric turbulence

图 2. 大气湍流下计算鬼成像示意图

加入式(5)中的 Gamma-Gamma 湍流, 接收到的光强由式(8)得到:

$$I_i = \int \phi_i(x, y) \times O(x, y) \times \varphi_i(x, y) dx dy \tag{8}$$

式中, $\phi_i(x, y)$ 为第 i 个调制矩阵, $O(x, y)$ 是描述对象光强度的函数, $\varphi_i(x, y)$ 是 Gamma-Gamma 分布的乘性噪声。

在大气湍流中, 利用湍流大气中光强起伏效应测量路径平均的 C_n^2 是一种直接有效的方法[23], 但是当湍流较强时, 产生的闪烁饱和现象会对闪烁方差和 C_n^2 之间的比例关系造成影响。基于光闪烁的孔径平均效应, 采用可见光波段配合模拟大孔径的接收, 可以在一定程度上实现对闪烁饱和现象的抑制。

根据光传输理论, 波长为 λ 的平面波经过大气湍流进行传播如果以 I 表示光强则在传播距离 L 处, 直径为 D 的孔径内接收的对数光强起伏方差如式(9)所示[23]:

$$\sigma_{ln}^2(D) = 4 \times (2\pi k)^2 \times \int_0^L dz \int_0^\infty \sin^2 \left[\frac{\gamma(L-z)}{2k} k^2 \right] \Phi_n(\kappa) \kappa F(\gamma\kappa) d\kappa \tag{9}$$

式中, K 为光波数; κ 为空间波数; γ 为球面波的传播因子; $\Phi_n(\kappa)$ 表示折射率起伏的空间谱密度, $F(\kappa)$ 是孔径滤波函数, 对于内外径之比为 ε 的圆环接收孔径, $F(\kappa)$ 如式(10)所示[24]:

$$F(\kappa) = \left(\frac{2}{1-\varepsilon^2} \right)^2 \left[\frac{J_1(\kappa D/2)}{\kappa D/2} - \varepsilon^2 \frac{J_1(\varepsilon \kappa D/2)}{\varepsilon \kappa D/2} \right]^2 \tag{10}$$

对于闪烁指数的测量, 通常是按照定义直接统计光强的均值和方差以确定闪烁指数, 闪烁指数是指光强起伏方差与光强均值平方的比值, 公式如(11)所示:

$$\beta_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \quad (11)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示统计平均; I 表示光束的随机光强。

已知在弱起伏条件下闪烁指数 β_I^2 与对数光强起伏方差 σ_{lnI}^2 的关系如(12)所示:

$$\beta_I^2 = \sigma_{lnI}^2 \quad (12)$$

如果能够测量出一定接收孔径内的 β_I^2 , 已知激光波长、路径长度、孔径参数就可以利用式(13)反过来计算 C_n^2 , (9)式带入(10)式并利用(12)式可以得出计算 C_n^2 的原理公式, 本文使用更简单的标定公式(13)计算:

$$C_n^2 = \frac{\beta_I^2(D)}{1.23k^{7/6}L^{11/6} \times \left[1 + 0.214(kD^2/4L)^{7/6}\right]^{-1} \times [0.44\exp(-L/1079.23) + 0.5]} \quad (13)$$

3. 测量结果和分析

在仿真中, 采用的待成像模型为 64×64 像素的二值图像(字母 USST, 黑白相间), 湍流的模型 Gamma-Gamma 函数。本文研究不同的湍流强度和不同激光波长, 和不同采样率对鬼成像图片造成的质量影响。并且基于光闪烁的孔径平均效应, 模拟计算了大气折射率结构常数, 为自适应获得较好的关联成像图像提供了保证。

本文使用峰值信噪比(PSNR)和误比特率(BER)来评价大气湍流信道下鬼成像图片的优劣。

误比特率是传输系统准确性和可靠性的一个指标。计算公式如(14)所示:

$$P_e = \frac{N_{Y_{xy}-X_{xy}}}{x \times y} \quad (14)$$

式中 $N_{Y_{xy}-X_{xy}}$ 为输入输出差值不为零的像素个数, $x \times y$ 为像素总数。方案为错误数据量和传输数据量之比。

为了避免使用一种评价指标的局限性, 本文同时使用 PSNR 作为评价指标。PSNR 是最普遍, 最广泛使用的评鉴画质的客观量测法。经过压缩、传输等操作后, 处理后的图像通常与原始图像不同。PSNR 通常用于比较信号的最大值和背景噪声。两幅图像之间的 PSNR 值越大, 失真越小, 两幅图像越相似。PSNR 可以通过式(15)和(16)来计算。

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|D(i, j) - Rd(i, j)\|^2 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} PSNR &= 10 * \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) \\ &= 20 * \log_{10} \left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

3.1. 不同距离下的成像对比

为保证关联的成像通道只受湍流影响, 取 N 为 100%。在分析不同传输距离下的影响时, 激光波长取 633 nm、1064 nm、1550 nm, 并将收发距离 d 设为一系列值。因此, 不同波长下的成像效果如图 3 所示:

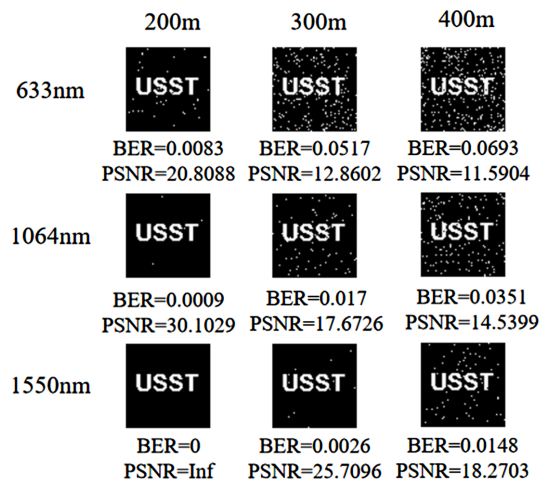
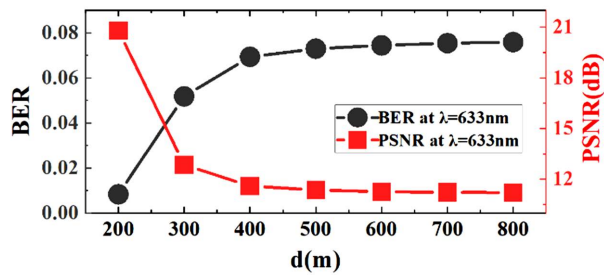
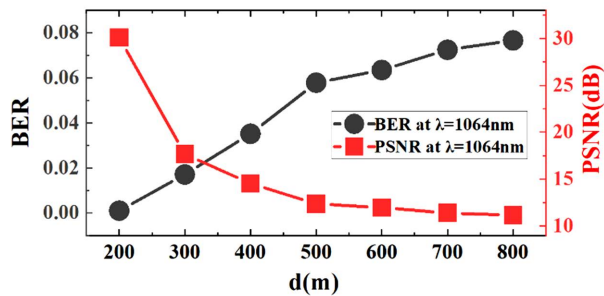


Figure 3. Imaging effect at different distances (in meters) $C_n^2 = 10^{-13}$

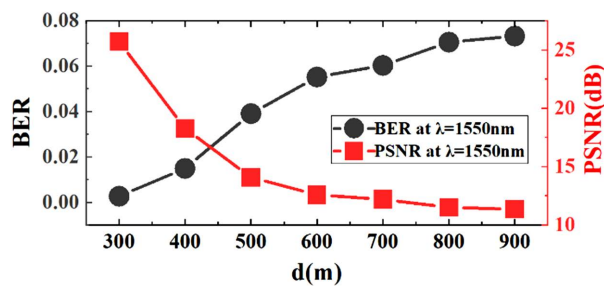
图 3. 不同距离的成像效果(以米为单位) $C_n^2 = 10^{-13}$



(a)



(b)



(c)

Figure 4. PSNR and BER curves at different distances, (a) $\lambda = 633 \text{ nm}$, (b) $\lambda = 1064 \text{ nm}$, (c) $\lambda = 1550 \text{ nm}$

图 4. 不同距离下的 PSNR 和 BER 曲线, (a) 波长为 633 nm, (b) 波长为 1064 nm, (c) 波长为 1550 nm

图 3 的 PSNR 和 BER 性能如图 4 所示。图 3 中可以看出，在相同的距离和相同的湍流强度下，激光波长的提升带来成像效果的提升。633 nm 激光在 200 米成像时信噪比较低，1064 nm 激光在 200 米成像比 633 nm 激光得到很大的提升，1550 nm 激光在 200 米可以得到完整的图像。

图 4 中当 $C_n^2 = 10^{-13} m^{-2/3}$ 时，100~400 米的情况下，633 nm、1064 nm 和 1550 nm 激光在成像性能上有着明显的区别。很明显，随着 d 的增加，PSNR 下降，而 BER 上升。随着激光波长的增加，PSNR 上升，而 BER 下降。当 d 增加到一个特定的值时，两者都趋于稳定，这个值随着激光波长的增加而变大。从图中可以看出 633 nm 激光在 200 米距离成像 PSNR 值大于 20，图像可以接受。1064 nm 激光光在 200 米距离成像 PSNR 值大于 30，图像质量是好的。1550 nm 激光光在 200 米距离可以得到完好的成像，且在 300 米距离成像 PSNR 值大于 20，图像质量是好的。可以得出成像距离的增加可以通过激光波长的提升来进行弥补。

3.2. 不同折射率结构参数的成像对比

同样，在分析不同 C_n^2 对不同波段激光成像造成的影响时，仍保证 N 为 100%。激光波长取 633 nm、1064 nm、1550 nm，并将 C_n^2 设定为一系列值，因此，不同 C_n^2 下的成像效果如图 5 所示。

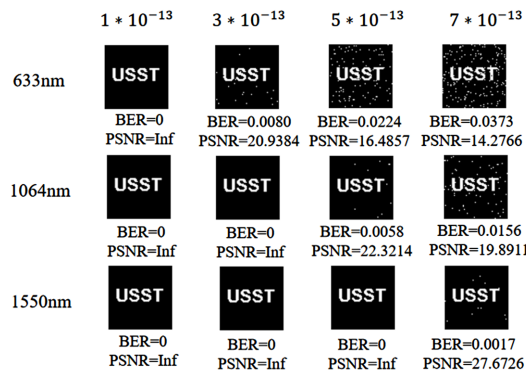
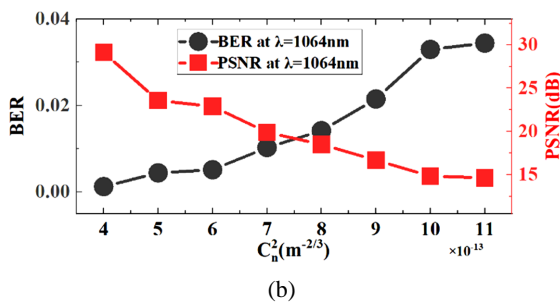
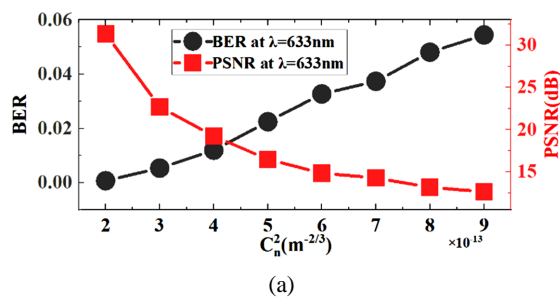


Figure 5. Imaging effect of different refractive index structure parameters (distance is 100 meters)

图 5. 不同折射率结构参数的成像效果(距离为 100 米)



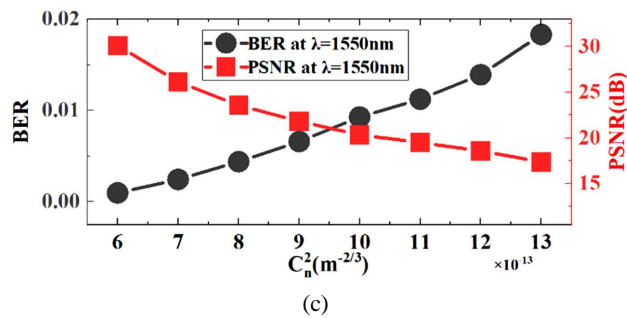


Figure 6. PSNR and BER curves under different structural parameters of atmospheric refractive index, (a) $\lambda = 633$ nm, (b) $\lambda = 1064$ nm, (c) $\lambda = 1550$ nm

图 6. 不同大气折射率结构参数下的 PSNR 和 BER 曲线, (a) 波长为 633 nm, (b) 波长为 1064 nm, (c) 波长为 1550 nm

图 5 的 PSNR 和 BER 性能如图 6 所示。图 5 中可以看出, 633 nm 激光成像时, 可以在 $1 \times 10^{-13} m^{-2/3}$ 强度下得到完整的图像。1064 nm 激光成像时, 可以在最多 $3 \times 10^{-13} m^{-2/3}$ 强度下得到完整的图像。1550 nm 激光成像时, 可以在最多 $5 \times 10^{-13} m^{-2/3}$ 强度下得到完整的图像。激光波长的提升对大气湍流的抗干扰能力明显。

图 6 中可以看出, 随着折射率结构参数的增加, 伴随着 BER 的增加和 PSNR 的减少。在采用 633 nm 激光时, 随着湍流增加, PSNR 的下降由快到慢, BER 的上升较为平稳。采用 1064 nm 激光时, 随着湍流增加 PSNR 的下降较为平稳, 但 BER 的上升较快。采用 1550 nm 激光时, 随着湍流增加, PSNR 和 BER 变化都较为平稳。其中, 当 PSNR 降低到 20 以下时, 即图像质量不可接受时, 湍流的增加所带来的 PSNR 降低将变缓。633 nm 激光在 $3 \times 10^{-13} m^{-2/3}$ 强度下的湍流 PSNR 值大于 20, 图像可以接受。1064 nm 激光在 $5 \times 10^{-13} m^{-2/3}$ 强度湍流下 PSNR 值大于 20, 1550 nm 激光将这个极限强度提升到 $7 \times 10^{-13} m^{-2/3}$ 。从图中可以分析出湍流强度的增加对成像的干扰可以通过激光波长的增加来弥补。

3.3. 不同采样率下的成像对比

接下来在 $C_n^2 = 10^{-15} m^{-2/3}$ 且距离为 2000 m 的情况下, 调整相关成像的采样率 N , 观察湍流对 N 的影响。如图 7 所示。随着 N 的增加, PSNR 增加, 而误比特率下降。当 N 低于 50% 时, 无论采用什么波长的激光束, 成像效果都不理想。当 $N = 75\%$ 时, 1064 nm 激光可以恢复原始图像, 当 $N = 50\%$ 时, 采用 1550 nm 激光可以恢复原始图像。在这个成像条件下, 633 nm 的激光成像在 50% 采样率下 PSNR 值小于 20, 图像不可接受, 1064 nm 激光波长在 50% 采样率下的成像 PSNR 值可以达到 20 以上, 图像可以接受。1550 nm 波长的激光进行 50% 采样率的成像所得的图片 PSNR 评价价值可以达到 29 以上, 接近于得到了好的成像。可以判断出激光波长的提升可以有效的提升相同采样率下的成像效果。而 50% 的采样率相比较 75% 的采样率在成像速度上有着显著的优势。采样率对关联成像的性能起到最大的影响, 在各方面影响较小的情况下, 可以考虑降低采样率提高成像性能。

3.4. 闪烁指数的测量对比

取激光波长为 633 nm, 距离为 200, 调整不同大小折射率结构参数, 测量折射率结构参数大小并进行记录分析。从图 8 中可以看出黑色线条为设置折射率结构参数, 红色线条为从闪烁系统测量的闪烁指数推导的折射率结构参数, 可以看出测量的折射率结构参数和设定值在数值上有微小差异, 但是在变化趋势上基本一致。从图 8 可以看出, 在 C_n^2 较小时, 测试的 C_n^2 较为准确, 对数据进行拟合, 拟合的相关系数为 0.93, 证明闪烁指数测量的准确性。

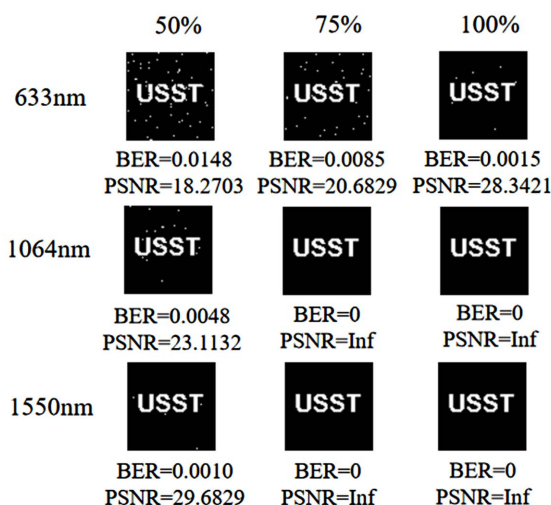


Figure 7. The imaging results under different sampling rate and different wavelength laser
图 7. 不同采样率和不同波长激光下的成像结果

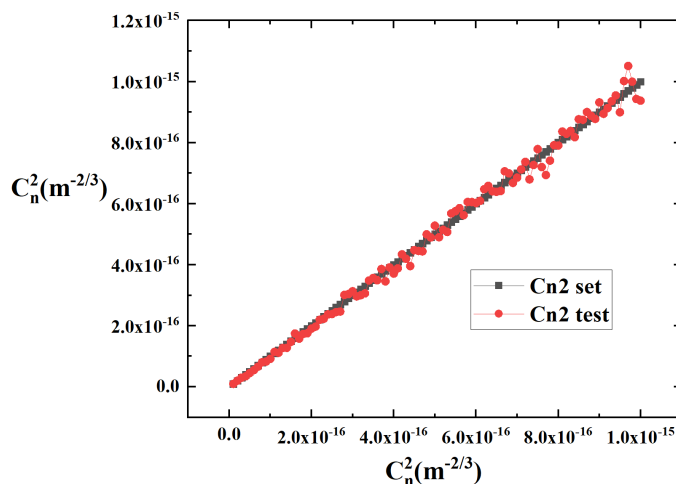


Figure 8. Scintillation index measurement comparison
图 8. 闪烁指数测量对比

4. 结论

本文研究了一种基于伽马大气湍流信道的自适应红外鬼成像系统，在添加了 Gamma-Gamma 湍流的基础上。分析了不同波长的激光束在湍流情况下对图像传输的影响，并且测量了大气折射率结构参数 C_n^2 的准确性。其中，湍流信道的关键参数即折射率结构参数和传输距离对成像有着很大的影响，可以通过拉长激光的波长进行弥补。根据检测到大气湍流的强弱，和已知的传输距离，在成像上采用不同的采样率和不同波长的光束进行成像，达到节省资源的目的。其中，采样率的降低对成像速度有着极为显著地减少，可以采用降低采样率并且提升激光的波长的措施进行快速的成像。整个工作为实际的通过大气湍流信道传输的自适应红外鬼影成像系统提供了理论模型的基础和参考。

基金项目

国家自然科学基金(No. 61805144)，上海帆船项目(No. 17YF1429400)。

参考文献

- [1] Klyshko, D.N. (1994) Quantum Optics: Quantum, Classical, and Metaphysical Aspects. *Physics-Uspekhi*, **37**, Article 1097. <https://doi.org/10.1070/PU1994v037n11ABEH000054>
- [2] Pittman, T.B., Shih, Y.H., Strekalov, D.V. and Sergienko, A.V. (1995) Optical Imaging by Means of Two-Photon Quantum Entanglement. *Physical Review A*, **52**, R3429. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.52.R3429>
- [3] Shapiro, J.H. (2008) Computational Ghost Imaging. *Physical Review A*, **78**, Article ID: 061802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.78.061802>
- [4] Sun, B., Welsh, S.S., Edgar, M.P., Shapiro, J.H. and Padgett, M.J. (2012) Normalized Ghost Imaging. *Optics Express*, **20**, 16892-16901. <https://doi.org/10.1364/OE.20.016892>
- [5] Gong, W., Yu, H., Zhao, C., et al. (2016) Improving the Imaging Quality of Ghost Imaging Lidar via Sparsity Constraint by Time-Resolved Technique. *Remote Sensing*, **8**, Article 991. <https://doi.org/10.3390/rs8120991>
- [6] Wang, L. and Zhao, S. (2016) Fast Reconstructed and High-Quality Ghost Imaging with Fast Walsh-Hadamard Transform. *Photonics Research*, **4**, 240-244. <https://doi.org/10.1364/PRJ.4.000240>
- [7] Lyu, M., Wang, W., Wang, H., et al. (2017) Deep-Learning-Based Ghost Imaging. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 17865. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18171-7>
- [8] Zhang, Z., Liu, S., Peng, J., et al. (2018) Simultaneous Spatial, Spectral, and 3D Compressive Imaging via Efficient Fourier Single-Pixel Measurements. *Optica*, **5**, 315-319. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000315>
- [9] Wu, G.H., Li, T.H., Li, J.H., Luo, B. and Guo, H. (2019) Ghost Imaging under Low-Rank Constraint. *Optics Letters*, **44**, 4311-4314. <https://doi.org/10.1364/OL.44.004311>
- [10] Li, C., Wang, T., Pu, J., Zhu, W. and Rao, R. (2010) Ghost Imaging with Partially Coherent Light Radiation through Turbulent Atmosphere. *Applied Physics B*, **99**, 599-604. <https://doi.org/10.1007/s00340-010-3969-y>
- [11] Erkmen, B.I. (2012) Computational Ghost Imaging for Remote Sensing. *Journal of the Optical Society of America A*, **29**, 782-789. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.29.000782>
- [12] Cheng, J. (2009) Ghost Imaging through Turbulent Atmosphere. *Optics Express*, **17**, 7916-7921. <https://doi.org/10.1364/OE.17.007916>
- [13] Hardy, N.D. and Shapiro, J.H. (2011) Reflective Ghost Imaging through Turbulence. *Physical Review A*, **84**, Article ID: 063824. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.84.063824>
- [14] Zhang, P.L., Gong, W.L., Shen, X. and Han, S.S. (2010) Correlated Imaging through Atmospheric Turbulence. *Physical Review A*, **82**, Article ID: 033817. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.82.033817>
- [15] Shi, D., Fan, C., Zhang, P., et al. (2012) Adaptive Optical Ghost Imaging through Atmospheric Turbulence. *Optics Express*, **20**, 27992-27998. <https://doi.org/10.1364/OE.20.027992>
- [16] Liu, X.L., Wang, F., Zhang, M.H. and Cai, Y.J. (2018) Effects of Atmospheric Turbulence on Lensless Ghost Imaging with Partially Coherent Light. *Applied Sciences*, **8**, Article 1479. <https://doi.org/10.3390/app8091479>
- [17] Wang, K.M., Wang, Z.R., et al. (2020) Influence of Atmospheric Turbulence Channel on a Ghost-Imaging Transmission System. *Current Optics and Photonics*, **4**, 1-8.
- [18] Wang, K.M., Wang, Z.R., Bai, C.Y., et al. (2020) Influence of Atmospheric Turbulence Channel on a Super-Resolution Ghost Imaging Transmission System Based on Plasmonic Structure Illumination Microscopy. *Frontiers in Physics*, **8**, Article ID: 546528. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.546528>
- [19] Wang, F., Wang, C.L., Chen, M.L., et al. (2022) Far-Field Super-Resolution Ghost Imaging with a Deep Neural Network Constraint. *Light: Science & Applications*, **11**, Article No. 1. <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00680-w>
- [20] Zhang, L.H., Wang, Y. and Zhang, D.W. (2022) Research on Multiple-Image Encryption Mechanism Based on Radon Transform and Ghost Imaging. *Optics Communications*, **504**, Article ID: 127494. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127494>
- [21] Al-Habash, A., Andrews, L.C. and Phillips, R.L. (2001) Mathematical Model for the Irradiance Probability Density Function of a Laser Beam Propagating through Turbulent Media. *Optical Engineering*, **40**, 1554-1562. <https://doi.org/10.1117/1.1386641>
- [22] Ghassemlooy, Z., Popoola, W. and Rajbhandari, S. (2019) Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with Matlab®. 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781315151724>
- [23] Weichel, H. (1990) Laser Beam Propagation in the Atmosphere. SPIE Press, Bellingham.
- [24] Ma, X.S., Zhu, W.Y. and Rao, R.Z. (2008) Large Aperture Laser Scintillometer for Measuring the Refractive Index Structure Constant of Atmospheric Turbulence. *Chinese Journal of Lasers*, **35**, 898-902. <https://doi.org/10.3788/CJL20083506.0898>