

气泡水平和温度梯度对水下鬼成像的影响

项 澜, 安 移, 蒋思凡

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2月24日; 录用日期: 2023年3月20日; 发布日期: 2023年3月27日

摘 要

计算鬼成像(CGI)是一种有望降低水下湍流信道带来的负面影响的方法。然而, 基于水下湍流信道的CGI传输系统的理论研究鲜有报道。本文研究了基于水下湍流信道的CGI和压缩感知计算鬼成像(CSCGI)系统的峰值信噪比(PSNR)性能和结构相似度(SSIM)性能。并选取两种典型的强度波动模型作为理论信道模型。所选模型的概率密度函数(PDF)分别服从指数广义Gamma分布(EGG)和指数Gamma分布(EG)。通过设置适当的气泡水平和温度梯度参数, 我们获得了上述方案的PSNR性能和SSIM性能以及可视化成像结果。我们的工作为未来研究基于水下湍流信道的实际CGI和CSCGI系统提供了理论参考。

关键词

计算鬼成像, 水下湍流, 指数广义Gamma分布

Effects of Bubble Level and Temperature Gradient on Underwater Computational Ghost Imaging

Lan Xiang, Yi An, Sifan Jiang

School of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 24th, 2023; accepted: Mar. 20th, 2023; published: Mar. 27, 2023

Abstract

Computational ghost imaging (CGI) is a promising method to reduce the negative effects of un-

underwater turbulent channels. However, the theoretical research of CGI transmission system based on underwater turbulent channel is rarely reported. This paper studies the peak signal-to-noise ratio (PSNR) performance and structural similarity (SSIM) performance of CGI and compressed sensing computational ghost imaging (CSCGI) systems based on underwater turbulent channels. Two typical intensity fluctuation models are selected as theoretical channel models. The probability density function (PDF) of the selected model obeys exponential generalized Gamma distribution (EGG) and exponential Gamma distribution (EG), respectively. By setting the appropriate bubble level and temperature gradient parameters, we obtain the PSNR performance, SSIM performance and visual imaging results of the above scheme. Our work provides a theoretical reference for future research on actual CGI and CSCGI systems based on underwater turbulent channels.

Keywords

Computational Ghost Imaging, Underwater Turbulence, Exponential-Generalized Gamma Distribution

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

水下成像技术应用范围广，在军事、海洋开发和工程应用中发挥了极其关键的作用。然而，经典水下光学成像的质量总会受到水下环境中的散射和吸收效应的影响，成为水下成像的关键问题[1]。与传统成像不同，鬼成像(GI)的抗干扰能力强。GI是量子光学领域的热点之一[2]，它的原理是基于光强波动的二阶相关性间接重构出图像。相较于普通成像中照明光场经成像物体后直接由面阵探测采集的方式，鬼成像的成像路径是将照明光场分成两个通道，一路经过待成像物体后用没有空间分辨率的桶探测器收集，另一通路不与物体接触，直接由面阵探测器采集，两通道的测量结果再经关联计算重构出物体图像[3]。

在鬼成像基础上，国内外研究人员开始研究湍流中鬼成像的问题。华南理工大学的 Cheng 于 2009 年讨论了在大气湍流中的鬼成像问题，其基于惠更斯-菲涅尔积分得到一个解析的成像公式[4]。2010 年，中国科学院上海光学精密机械研究所 Zhang 等人分析了大气湍流对鬼成像分辨率的影响[5] [6]。2012 年，美国喷气动力实验室的 Erkmén 将计算鬼成像技术应用于遥感探测中，并详细分析了大气湍流、背景辐射和探测器噪声对鬼成像遥感分辨率和信噪比的影响[7]。上述研究结果表明在大气湍流情况下，鬼成像的分辨率高于直接成像。在水下成像这方面，2017 年，Mingnan Le 针对不同混浊度，从不同角度考察了水下条件下的计算鬼成像，得出了 CGI 可以削弱水体介质浊度变化的影响，可用于模拟远距离水下成像或探测的结论[8]。2019 年，Qin-Wei Zhang 等基于湍流功率谱和扩展的惠更斯-菲涅耳积分，得到了海洋湍流中 GI 的脉冲响应函数和能见度的理论表达式，并且其结果表明，海洋湍流作用下的 GI 质量与湍流强度和光的传播距离有关[9]。同年，Man-Qian Yin 通过实验研究了水下环境对 GI 成像的影响质量，通过实验得出 CGI 具有一定的抗水下湍流成像能力[10]。

在这些研究中讨论了一些水下鬼成像的情况，但没有提及到水下光学湍流(UOT)对水下鬼成像的影响。UOT 是由于温度波动、盐度变化以及海水中的气泡影响光信号传播而导致水体折射率迅速变化的结果[11] [12] [13]。在海洋中，气泡是由海浪产生的[14]，并且被发现可以显著地增强光的散射过程[15]。

而且水下气泡的存在及其对光信号传播的影响已经得到了很好的证实[16] [17] [18]。基于 Mie 散射理论[19]，气泡的影响在以前的一些工作中已经被表征，直到最近，人们才通过一系列的实验研究了气泡对辐照度分布的影响[20] [21]。这些研究表明，在水体中有气泡存在的情况下，辐照度的分布模型可以用指数分布和对数正态分布的混合物精确地模拟，这种混合物也可以用 Gamma 分布来代替。这种对数正态分布或者类似的 Gamma 分布的存在与之前的研究结果一致，表明它可以用来模拟水下光学通道。Emna Zedini 等人提出了混合指数广义 Gamma (EGG)分布模型，该模型准确地描述了气泡和温度梯度辐照度波动从弱到强的湍流条件[22]。

在上述的所有研究中，理论和实验结果表明，CGI 方案对散射介质或大气湍流还有水下环境中比传统的成像系统更稳健，CGI 在复杂环境下的成像能力强于一般成像。本文中，我们将基于水下湍流带来的温度梯度波动和气泡波动的变化对成像的影响，研究一种基于 EGG 的压缩感知计算鬼成像系统(EGG-CSCGI)。通过设置对比不同信道的温度梯度参数的适当值和气泡范围，得到峰值信噪比(PSNR)性能和结构相似性(SSIM)用来评价成像质量，为进一步研究水下湍流计算鬼成像算法提供了理论模型。

本文的其余内容分为三个部分：第二部分介绍了 CSCGI 和水下湍流信道理论，并讨论成像的系统方案。在第三部分中，进行模拟仿真实验，并对实验结果进行分析。最后，在第四节我们对整个工作进行了总结。

2. 原理分析与系统方案描述

2.1. 水下湍流信道模型的理论分析

模拟水下湍流总体上有两种方法：第一种通过功率谱反演法将水下湍流引起的折射率变化对传输光束产生的影响等效为随机相位屏对光束的影响，第二种方法是研究水下湍流对光强的影响，即光强的概率分布模型，这种由分子运动理论推导的概率密度函数(Probability Density Function)输运方程，简称 PDF 模型。与通常的湍流模型相比，PDF 模型能够对湍流流场进行更为精确和完整的描述。

在关联成像中，有一个桶探测器接收传输图像的总强度，而图像中每个像素的分辨率和相位并不是主要问题。因此，我们应用第二种方法，即概率分布模型(PDF)，来模拟湍流。广义 Gamma 分布(GGD)被用于对海洋环境要素的统计，GGD 作为三参数的统计模型，能够对单因素进行描述，而且其二维统计模型能更真实地反映海洋环境。GGD 模型改变了其他模型的单一性、无法反映实际海洋情况以及拟合误差大的情况。而 Emna Zedini 提出的混合指数广义伽马(EGG)分布模型，该模型在所有信道条件下都具有良好的拟合优度。EGG 分布模拟了水体中由于气泡和温度引起的光波辐照度的涨落，混合 EGG 分布是指数分布和广义伽马分布的加权和，可以表示为[22]：

$$f_I(I) = \omega f(I; \lambda) + (1 - \omega) g(I; [a, b, c]) \quad (1)$$

$$f(I; \lambda) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{I}{\lambda}\right) \quad (2)$$

$$g(I; [a, b, c]) = c \frac{I^{ac-1} \exp\left(-\left(\frac{I}{b}\right)^c\right)}{b^{bc-1} \Gamma(a)} \quad (3)$$

f 和 g 分别是指数分布和广义 Gamma 分布，其中 ω 是 EGG 分布的混合系数，满足 $0 < \omega < 1$ ， λ 是指数分布相关的参数， b 为尺度参数， a 和 c 为形状参数， $\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma 函数。

EGG 的闪烁指数 σ_I^2 ，可以表示为[22]：

$$\sigma_i^2 = \frac{2\omega\lambda^2 + (1-\omega)b^2 \frac{\Gamma\left(a + \frac{2}{c}\right)}{\Gamma(a)}}{\left[\omega\lambda + (1-\omega) \frac{b\Gamma\left(a + \frac{1}{c}\right)}{\Gamma(a)}\right]^2} - 1 \quad (4)$$

我们根据 Emna Zedini 提出的 EGG 分布模型来描述水下湍流信道，当环境温度均匀时，采用指数 Gamma (EG)分布来进行描述。表 1 列出了基于气泡水平和温度梯度的水下光湍流信道所提出的 EGG，EG 的估计参数。

Table 1. EGG and EG parameters of underwater optical communication system

表 1. 水下光通信系统的 EGG、EG 参数

气泡水平 (L/min)	温度梯度 (°C·cm ⁻¹)	EGG		EG	
		σ_i^2	$\sigma_i^2 (\omega, \lambda, a, b, c)$	σ_i^2	(ω, λ, a, b)
2.4	0.05	0.1484	(0.2130, 0.3291, 1.299, 1.1817, 17.1984)	0.1521	(0.2324, 0.3831, 393.5944, 0.0030)
2.4	0.10	0.1693	(0.2108, 0.2694, 0.6020, 1.4201, 22.5924)	0.1726	(0.2570, 0.3897, 227.8358, 0.0053)
2.4	0.15	0.1915	(0.1807, 0.1641, 0.2334, 1.4201, 22.5924)	0.2033	(0.2877, 0.4077, 79.2682, 0.0156)
2.4	0.20	0.2178	(0.1665, 0.1207, 0.1559, 1.5216, 22.8754)	0.2346	(0.3183, 0.4246, 48.5897, 0.0261)
4.7	0.05	0.4201	(0.4589, 0.3449, 1.0421, 1.5768, 35.9424)	0.4171	(0.4811, 0.39726, 1382.8, 0.0011)
4.7	0.10	0.4769	(0.4539, 0.2744, 0.3008, 1.7053, 54.1422)	0.4646	(0.5129, 0.3978, 822.3038, 0.8439)

2.2. 基于水下湍流信道的 CSCGI 设计方案

为了提高采样速率和重构图像质量，在鬼成像基础上采取了一系列措施，我们使用 Hadamard 矩阵作为计算鬼成像的光源调制矩阵，对待测物体进行照射，和压缩感知算法。

Hadamard 矩阵是一个 n 阶正交矩阵，由 1 和 -1 构成，其列不相关且相互正交。该特性使 Hadamard 矩阵比其他调制矩阵能够更好地重构。进行计算鬼成像时，我们将一组 64×64 的 Hadamard 散斑 $\varphi_i(x, y)$ 载到 DMD 上生成，激光打在 DMD 上，反射出调制光线打到待成像物体 $D(x, y)$ 上，透过物体的光被桶探测器(只探测透过物体的总光强，无任何分辨率)记录，计算得到总光强 I_i ，经过 N 次采样后，将调制矩阵和桶探测器的值进行关联计算，就能够恢复出物体的图像。关联函数如下[23] [24]:

$$I_i = \iint \Phi_i(x, y) \times D(x, y) dx dy \quad (5)$$

$$O_{CGI}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - \langle I \rangle) \Phi_i(x, y) = \langle I_i \Phi_i(x, y) \rangle - \langle I \rangle \Phi_i(x, y) \quad (6)$$

其中， $\langle I \rangle$ 为平均光强值， N 为采样次数。

压缩感知(Compressed Sensing), 也被称为压缩采样(Compressive Sampling)或稀疏采样(Sparse Sampling), 是一种寻找欠定线性系统的稀疏解的技术。作为一种新的信号处理方法, 压缩感知可以使用远少于待测物体信息的奈奎斯特采样点数据来精确恢复物体信息, 极大地节约了采样时间[25]。实现了低采样高重构, 将压缩感知和鬼成像结合, 有效减少了采样次数, 提高了图像的重构质量。压缩感知公式为[26]:

$$y = \phi x = \phi \psi s \tag{7}$$

x 为长度为 N 的原始一维信号, 稀疏度为 k ; ϕ 为观测矩阵, 将原始高维信号 x 投影到低维空间, 是已知的; y 为长度为 M 的一维测量值, 是已知的。已知测量值 y 和测量矩阵 ϕ , 求解方程即可得到原始信号 x 。一般情况下自然信号不是稀疏的, 就需要将其先投影到稀疏基上再进行运算。令 $x = \psi s$, ψ 为稀疏基矩阵, s 为稀疏系数, 压缩感知方程就变成 $y = \phi \psi s$, y, ϕ 已知, 解出 s 即可得到所需要的 x 。

计算鬼成像中, 桶探测器记录的光强值 I_i 即为压缩感知中的测量值 y , 每次测量使用的随机矩阵 $\phi_i(x, y)$ 拉伸为行向量, 作为压缩感知的观测矩阵 ϕ_i , 待成像物体 $D_i(x, y)$ 即为压缩感知中的原始信号 x , 由此得到压缩感知计算鬼成像函数:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_z \end{bmatrix}_{z \times 1} = \begin{bmatrix} \phi_1(1,1) & \cdots & \phi_1(1,y) & \cdots & \phi_1(2,1) & \cdots & \phi_1(x,y) \\ \phi_2(1,1) & \cdots & \phi_2(1,y) & \cdots & \phi_2(2,1) & \cdots & \phi_2(x,y) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_i(1,1) & \cdots & \phi_i(1,y) & \cdots & \phi_i(2,1) & \cdots & \phi_i(x,y) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_z(1,1) & \cdots & \phi_z(1,y) & \cdots & \phi_z(2,1) & \cdots & \phi_z(x,y) \end{bmatrix}_{z \times z} \begin{bmatrix} D_{11} \\ D_{12} \\ \vdots \\ D_{iy} \\ \vdots \\ D_{xy} \end{bmatrix} \tag{8}$$

水下湍流模型的压缩感知计算鬼成像中的系统传输示意图见 图 1。激光在被 DMD 的调制矩阵 $\phi_i(x, y)$ 调制后, 通过湍流 $\phi_i(x, y)$, 然后照射物体 $O(x, y)$, 又经过一片然后湍流 $\phi_i(x, y)$, 最后被桶形探测器接收。经过相关计算, 重构出原始图像。接收到的光强由公式(9)得到。

$$I_i = \iint \phi_i(x, y) \phi_i(x, y) O(x, y) \phi_i(x, y) dx dy \tag{9}$$

这里, $\phi_i(x, y)$ 是第 i 个调制矩阵, $O(x, y)$ 用来描述物体光强的函数, 并且, $\phi_i(x, y)$ 是具有指数广义 Gamma 分布的乘性噪声。

将桶探测器的湍流接收函数引入到方程式的压缩感知计算鬼成像中, 由(8)和(9)得到重建图像的强度数组, 如式(10)所示:

$$\begin{bmatrix} O(1,1) \\ O(1,2) \\ \vdots \\ O(1+i\sqrt{z}, i \bmod \sqrt{z}) \\ \vdots \\ O(x,y) \end{bmatrix}_{z \times 1} = \begin{bmatrix} \phi_1(1,1) & \cdots & \phi_1(1,y) & \cdots & \phi_1(2,1) & \cdots & \phi_1(x,y) \\ \phi_2(1,1) & \cdots & \phi_2(1,y) & \cdots & \phi_2(2,1) & \cdots & \phi_2(x,y) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_i(1,1) & \cdots & \phi_i(1,y) & \cdots & \phi_i(2,1) & \cdots & \phi_i(x,y) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_z(1,1) & \cdots & \phi_z(1,y) & \cdots & \phi_z(2,1) & \cdots & \phi_z(x,y) \end{bmatrix}_{z \times z}^{-1} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix}_{z \times 1} \tag{10}$$

这里 z 是样本总数, $\phi_i(x, y)$ 是由每个样本的调制矩阵拉伸的行向量, I_i 是桶探测器接收到的值, 可以用公式(9)计算。

3. 基于水下湍流信道的压缩传感计算鬼成像传输系统的仿真

本文在压缩感知计算鬼成像系统的基础上, 选取 64*64 的图像(字母 Ocean, 黑底白字)进行鬼成像, 同时引入水下湍流指数广义 Gamma 模型, 改变指数广义 Gamma 函数的其中尺度参数和形状参数来调整

水下湍流的温度梯度和气泡水平，研究水下湍流对鬼成像系统性能的影响。EGG 模型根据公式(1)生成 EGG 分布矩阵，作为乘性因子，加入鬼成像系统中。

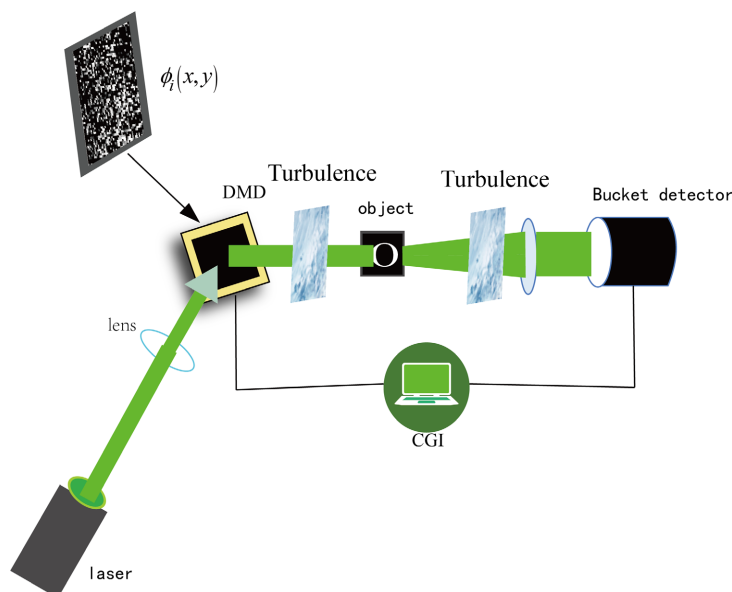


Figure 1. Underwater turbulence computational ghost imaging schematic
图 1. 水下湍流计算鬼成像原理图

为了检测重构图像的质量，本文使用峰值信噪比(PSNR)和结构相似度(SSIM)这两个客观评价指标来检测图像。

PSNR 是图像质量的客观差异。为了测量处理后的图像的质量，通常使用 PSNR 值来确定压缩传输过程中评价指标，最常用于图像处理过程中。PSNR 值可用式(11)，(12)计算[27]:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|D(i, j) - O(i, j)\|^2 \quad (11)$$

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MSX_1^2}{MSE} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{MSX_1}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (12)$$

这里 MSE 是原始图像与输出图像之间的均方误差，MAX₁ 表示图像颜色的最大值。其中 m 和 n 分别是图像长度和宽度上的像素个数，D(x, y) 和 O(x, y) 分别是原始图像和关联成像后的图像在点(i, j)处的灰度值。

SSIM 是通过亮度失真、对比度失真以及结构失真对图像进行了综合考查。两张图像的结构相似性按照以下方式求出[28] [29]:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2\sigma_y^2 + c_2)} \quad (13)$$


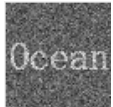








式中：其中 μ_x 是 x 的平均值， μ_y 是 y 的平均值， σ_x^2 是 x 的方差， σ_y^2 是 y 的方差， σ_{xy} 是 x 和 y 的协方差。 $c_1 = (k_1L)^2$ ， $c_2 = (k_2L)^2$ 是用来维持稳定的常数。L 是像素值的动态范围， k_1 和 k_2 分别取 0.01 和 0.03。结构相似性的范围为-1 到 1。当两张图像一模一样时，SSIM 的值等于 1。

3.1. 相同气泡水平不同温度梯度下水下湍流信道对 CGI 的影响分析

为了保证关联成像通道仅受水下湍流的影响, N 取 100%。分析气泡水平为 2.4 (L/min) 不同温度梯度的影响下不同水下湍流信道直接关联成像的成像效果, 温度梯度为(0.05, 0.10, 0.15, 0.20) $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$, 成像图见表 2。图 2 给出基于表 1 在 0.15 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时 EG 和 EGG 的概率密度曲线图, 我们可以看出, 在 0.15 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, EG 的拉伸形状幅度变大, 精度开始下降, 而 EGG 则能够很好的匹配数据, 这极好的一致性表明, EGG 分布是最适合表征气泡和温度诱导湍流引起的水下光信号辐照度波动的概率分布。

Table 2. CGI imaging effect under different temperature gradients at the same bubble level

表 2. 相同气泡水平不同温度梯度 CGI 成像效果

温度梯度($^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$)	0.05	0.10	0.15	0.20	original
EG					
EGG					

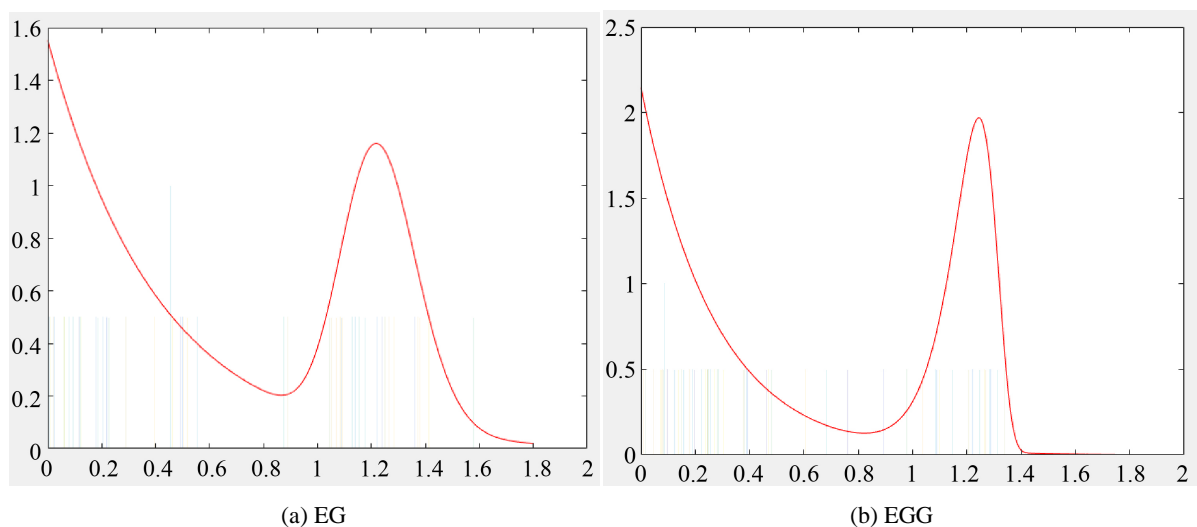


Figure 2. EG, EGG probability density curve at 0.15 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$

图 2. 0.15 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时 EG, EGG 概率密度曲线图

如图 3 中的 A 图 SSIM 曲线看, 二条通道的 SSIM 值都集中在 0.08~0.1 这一区间范围, SSIM 值较小, 说明直接 CGI 的成像效果并不是特别理想, 从图中看出, 随着温度梯度增加, SSIM 值也随之减小。而图 3 中 B 图的 PSNR 曲线来看, 直接 CGI 的 PSNR 值在较低的位置, 也可说明直接 CGI 得效果较差我们可以看到, 当温度梯度 0.05 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ ~0.10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, EG 下降了 0.13 dB, EGG 下降了 0.24 dB。从 0.10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ ~0.15 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$, EG 下降了 1.20 dB, EGG 下降了 1.40 dB, 在之后一个温度梯度 0.15 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ ~0.20 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$, EG 下降了 0.32 dB, EGG 下降了 0.28 dB。直接 CGI 成像的效果总体来说是较差的, 而我们接下来看 CSCGI 的成像效果。

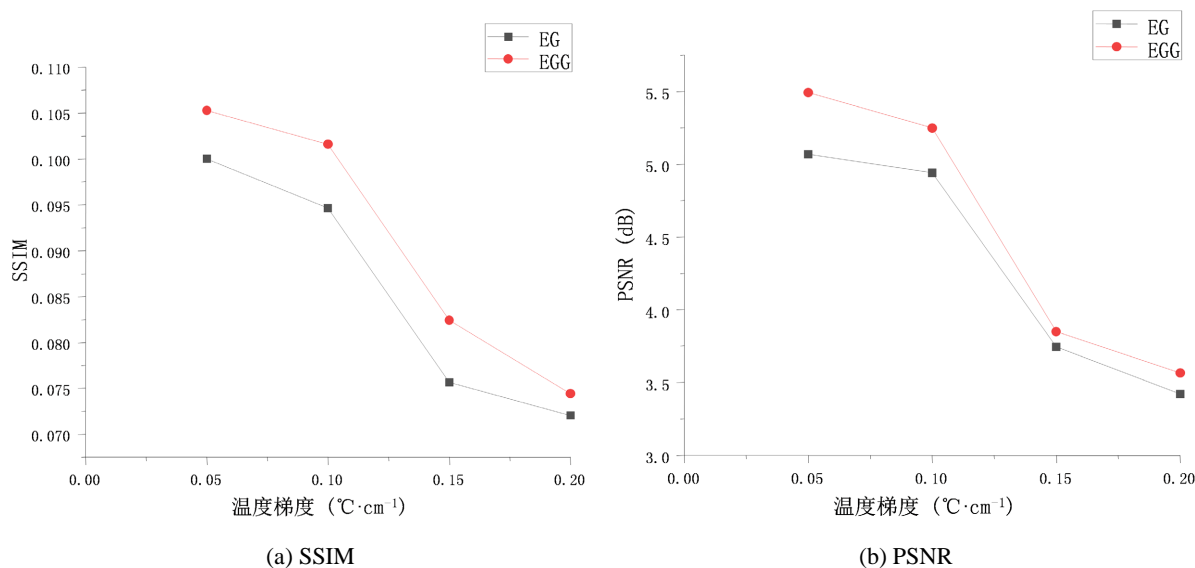


Figure 3. PSNR and SSIM of CGI with the same bubble level and different temperature gradients











图 3. 相同气泡水平不同温度梯度 CGI 的 PSNR 和 SSIM

3.2. 相同气泡水平不同温度梯度下水下湍流信道对 CSCGI 的影响分析

为了保证压缩感知计算鬼成像通道仅受水下湍流的影响, N 取 100%, 分析相同气泡水平不同温度梯度的影响下 CSCGI 的成像效果, 气泡水平为 2.4 L/min, 温度梯度为(0.05, 0.10, 0.15, 0.20) $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$, 成像图见表 3。

Table 3. CSCGI imaging effect under different temperature gradients at the same bubble level

表 3. 相同气泡水平不同温度梯度 CSCGI 成像效果

温度梯度($^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$)	0.05	0.10	0.15	0.20	original
EG					
EGG					

从表 3 重构出来的图我们可以看出, 经过压缩感知处理过的鬼成像相较于直接鬼成像的效果要好的多, 重构效果明显。从图 4 的 C 图, 我们可以看到, 两条通道的 SSIM 处于 0.35~0.46 这一区间段范围内, 从曲线趋势来看, 随着温度梯度的增加, SSIM 值在逐步减小。接下来看图 4 中 D 图的 PSNR 曲线, 我们可以看到二条信道的 PSNR 值都相对较高, 随着温度梯度的递增, 信道干扰剧烈, 峰值信噪比降低。在 $0.05^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}\sim 0.10^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$, EG 下降了 0.68 dB, EGG 下降了 1.02 dB。在 $0.10^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}\sim 0.15^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 这一温度梯度范围内, 二个通道都有显著下降, EG 下降了 5.13 dB, EGG 下降了 4.72 dB。在之后一个温度梯度 $0.15^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}\sim 0.20^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$, 两条通道的 PSNR 值下降幅度变缓, EG 下降了 0.65 dB, EGG 下降了 1.38 dB。

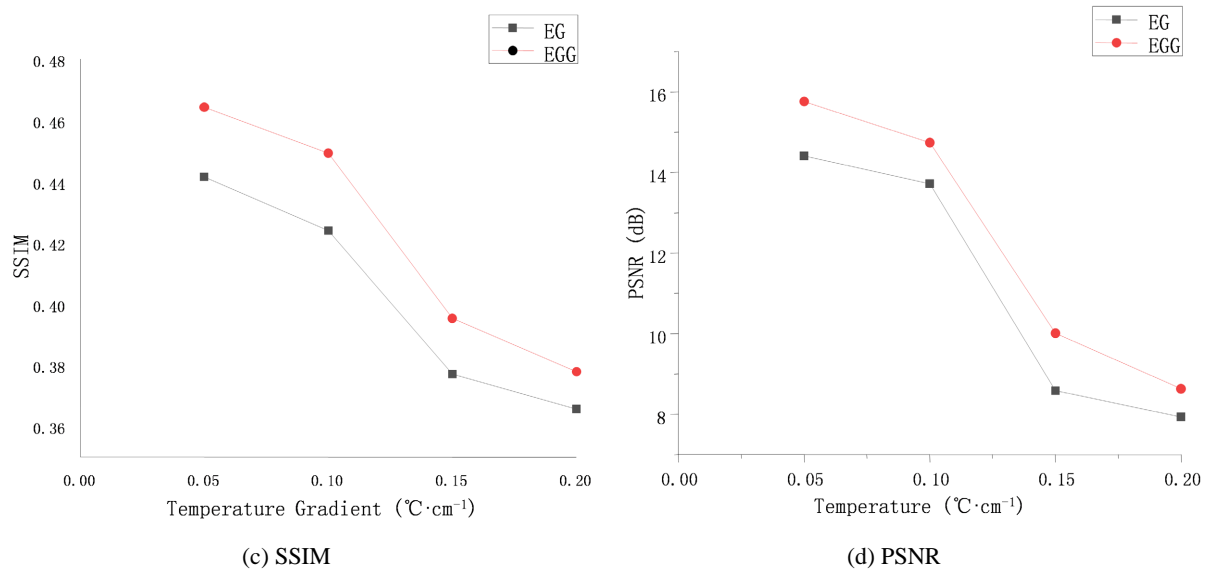


Figure 4. PSNR and SSIM of CGI with the same bubble level and different temperature gradients

图 4. 相同气泡水平不同温度梯度 CSCGI 的 PSNR 和 SSIM

3.3. 结果分析

我们的结果分析如下：

1) 从基于水下湍流信道的直接 CGI 在不同温度梯度影响下的成像结果来看，成像效果与温度梯度呈负相关。而根据相应的 SSIM 和 PSNR 性能可以发现，随着温度梯度的增大，EGG 通道下的 CGI 在两个通道中整体表现出最稳定的 SSIM 和最好的 PSNR。

2) 从基于水下湍流信道的 CSCGI 在不同温度梯度影响下的成像结果来看，成像效果也与温度梯度负相关，成像结果明显比 CGI 方案清晰。在 SSIM 和 PSNR 性能方面，基于 EGG 的方案在 SSIM 的稳定性和 PSNR 的占优性方面总体表现出优势。与 CGI 方案相比，CSCGI 方案的 SSIM 和 PSNR 性能明显更优。

3) 此外，虽然 CSCGI 方案表现出更好的成像结果以及 SSIM 和 PSNR 性能，但是 CSCGI 方案在稀疏性、内存容量和计算复杂度等方面存在一定的局限性。

4. 结论

本文研究了基于指数广义 Gamma (EGG) 水下湍流信道模型的压缩感知计算鬼成像系统的重构性能，分析了水下湍流信道中光强对鬼成像图像传输的影响。具体来说，光强的影响由水下湍流通道的关键参数决定，即 EGG 的相关参数所决定。从 EGG-CSCGI 仿真结果表明，随着水下湍流的增强，成像质量明显下降，而关键参数确定的气泡水平和温度梯度与 PSNR 呈负相关，随着温度梯度的增大，PSNR 和 SSIM 趋近于一定的常数。而且通过将直接 CGI 和 CSCGI 这两种方式的成像效果对比，CSCGI 的成像效果远好过于直接 CGI 的成像效果。我们整个工作为压缩感知鬼成像系统通过水下湍流信道传输提供了理论模型基础和参考。

基金项目

国家自然科学基金(61875125); 上海市自然科学基金(18ZR1425800)。

参考文献

- [1] 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-R3432. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.52.R3429>
- [2] Shapiro, J.H. and Boyd, R.W. (2012) The Physics of Ghost Imaging. *Quantum Information Processing*, **11**, 949-993. <https://doi.org/10.1007/s11128-011-0356-5>
- [3] 乐明楠, 李建波, 张薇, 李斌, 赵国英, 彭进业, 章勇勤, 赵万青, 王珺. 基于计算鬼成像的目标识别模型构建、识别方法及装置[P]. 中国专利, CN111652059A. 2020-09-11.
- [4] Cheng, J. (2009) Ghost Imaging through Turbulent Atmosphere. *Optics Express*, **17**, 7916-7921. <https://doi.org/10.1364/OE.17.007916>
- [5] Zhang, P., Gong, W., Shen, X. and Han, S. (2010) Correlated Imaging through Atmospheric Turbulence. *Physical Review A*, **82**, Article ID: 033817. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.82.033817>
- [6] 赵明, 王钰, 田芷铭, 赵美晶. 水下推扫式计算鬼成像的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(16): 132-136.
- [7] 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>
- [8] Le, M.N., Wang, G., Zheng, H.B., Liu, J.B., Zhou, Y. and Xu, Z. (2017) Underwater Computational Ghost Imaging. *Optics Express*, **25**, 22859-22868. <https://doi.org/10.1364/OE.25.022859>
- [9] Zhang, Q.-W., Li, W.-D., Liu, K., et al. (2019) Effect of Oceanic Turbulence on the Visibility of Underwater Ghost Imaging. *Journal of the Optical Society of America A*, **36**, 397-402. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.36.000397>
- [10] Yin, M.-Q., Wang, L. and Zhao, S.-M. (2019) Experimental Demonstration of Influence of Underwater Turbulence on Ghost Imaging. *Chinese Physics B*, **28**, Article ID: 094201. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ab33ee>
- [11] Hill, R.J. (1978) Optical Propagation in Turbulent Water. *Journal of the Optical Society of America*, **68**, 1067-1072. <https://doi.org/10.1364/JOSA.68.001067>
- [12] Nikishov, V.V. and Nikishov, V.I. (2000) Spectrum of Turbulent Fluctuations of the Sea-Water Refraction Index. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, **27**, 82-98. <https://doi.org/10.1615/InterJFluidMechRes.v27.i1.70>
- [13] Korotkova, O., Farwell, N. and Shchepakina, E. (2012) Light Scintillation in Oceanic Turbulence. *Waves in Random and Complex Media*, **22**, 260-266. <https://doi.org/10.1080/17455030.2012.656731>
- [14] Blanchard, D.C. and Woodcock, A.H. (1957) Bubble Formation and Modification in the Sea and Its Meteorological Significance. *Tellus*, **9**, 145-158. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v9i2.9094>
- [15] Dombrovsky, L., Randrianalisoa, J., Baillis, D., et al. (2005) Use of Mie Theory to Analyze Experimental Data to Identify Infrared Properties of Fused Quartz Containing Bubbles. *Applied Optics*, **44**, 7021-7031. <https://doi.org/10.1364/AO.44.007021>
- [16] Hagem, R.M., Thiel, D.V., O'Keefe, S.G. and Fickenscher, T. (2012) The Effect of Air Bubbles on an Underwater Optical Communications System for Wireless Sensor Network Applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, **54**, 729-732. <https://doi.org/10.1002/mop.26664>
- [17] Dacey, J.W. (2001) Encyclopedia of Ocean Sciences. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, **2001**, 131-137.
- [18] Farmer, D.M. and Lemon, D.D. (1984) The Influence of Bubbles on Ambient Noise in the Ocean at High Wind Speeds. *Journal of Physical Oceanography*, **14**, 1762-1778. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1984\)014<1762:TIOBOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<1762:TIOBOA>2.0.CO;2)
- [19] Zhang, X., Lewis, M. and Johnson, B. (1998) Influence of Bubbles on Scattering of Light in the Ocean. *Applied Optics*, **37**, 6525-6536. <https://doi.org/10.1364/AO.37.006525>
- [20] Davis, G.E. (1955) Scattering of Light by an Air Bubble in Water. *Journal of the Optical Society of America*, **45**, 572-572. <https://doi.org/10.1364/JOSA.45.000572>
- [21] Jamali, M.V., et al. (2016) Statistical Distribution of Intensity Fluctuations for Underwater Wireless Optical Channels in the Presence of Air Bubbles. 2016 *Iran Workshop on Communication and Information Theory (IWCIT)*, Tehran, 3-4 May 2016. <https://doi.org/10.1109/IWCIT.2016.7491626>
- [22] Zedini, E., Oubei, H.M., Kammoun, A., et al. (2019) Unified Statistical Channel Model for Turbulence-Induced Fading in Underwater Wireless Optical Communication Systems. *IEEE Transactions on Communications*, **67**, 2893-2907.
- [23] Clemente, P., et al. (2010) Optical Encryption Based on Computational Ghost Imaging. *Optics Letters*, **35**, 2391-2393. <https://doi.org/10.1364/OL.35.002391>
- [24] Wang, K., Wang, Z., Bai, C., 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 546528. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.546528>

- [25] Katkovnik, V. and Astola, J. (2012) Compressive Sensing Computational Ghost Imaging. *Journal of the Optical Society of America A*, **29**, 1556-1567. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.29.001556>
- [26] Liu, Z., Tan, S., Wu, J., *et al.* (2016) Spectral Camera Based on Ghost Imaging via Sparsity Constraints. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 25718. <https://doi.org/10.1038/srep25718>
- [27] Horé, A. and Ziou, D. (2010) Image Quality Metrics: PSNR vs. SSIM. 2010 *20th International Conference on Pattern Recognition*, Istanbul, 23-26 August 2010. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2010.579>
- [28] Wang, Z., Bovik, A.C., Sheikh, H.R. and Simoncelli, E.P. (2004) Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, **13**, 600-612. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>
- [29] 张晗. 基于深度学习的图像超分辨率重建应用初探[J]. *智能计算机与应用*, 2020, 10(5): 136-138+142.