

近红外上转换成像理论模拟研究

钱喆晔, 高兰兰*, 余益欣, 李恬媛, 井志远, 回斌硕

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年2月28日; 录用日期: 2024年4月17日; 发布日期: 2024年4月25日

摘要

近红外非线性成像在医疗诊断、生物科学、环境检测和安全检查等领域中应用广泛。本文结合柯林斯近似理论, 推导了基频光、信号光及和频光光强分布公式, 为提高和频效率及改善光束质量提供了理论依据; 其次根据推导的光强分布公式, 利用Matlab软件模拟了三波光强分布图像。基于相同光路, 同时利用Zemax软件模拟了三波光强分布图像, 并与Matlab模拟结果进行了对比分析, 结果一致。最后, 在Zemax软件模拟的和频光光强分布图上, 增加了高斯白噪声, 并通过空域滤波对图像进一步优化, 图像质量得到了明显改善。本文的研究成果为上转换成像研究提供了理论支持。

关键词

上转换成像, 光场分布, 滤波

Theoretical Simulation Study on Near Infrared Upconversion Imaging

Zhaye Qian, Lanlan Gao*, Yixin Yu, Tianyuan Li, Zhiyuan Jing, Binshuo Hui

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Feb. 28th, 2024; accepted: Apr. 17th, 2024; published: Apr. 25th, 2024

Abstract

Near infrared nonlinear imaging is widely used in fields such as medical diagnosis, bioscience, environmental detection, and safety checks. This article combines Collins approximation theory to derive the intensity distribution formulas for fundamental frequency light, signal light, and sum frequency light, providing a theoretical basis for improving sum frequency efficiency and beam quality; Secondly, based on the derived formula for light intensity distribution, three wave light intensity distribution images were simulated using Matlab software. Based on the same optical path, three wave intensity distribution images were simulated using Zemax software, and com-

*通讯作者。

文章引用: 钱喆晔, 高兰兰, 余益欣, 李恬媛, 井志远, 回斌硕. 近红外上转换成像理论模拟研究[J]. 应用物理, 2024, 14(4): 203-213. DOI: 10.12677/app.2024.144025

pared and analyzed with Matlab simulation results, which were consistent. Finally, Gaussian white noise was added to the sum frequency light intensity distribution map simulated by Zemax software, and the image was further optimized through spatial filtering, resulting in a significant improvement in image quality. The research results of this article provide theoretical support for upconversion imaging research.

Keywords

Upconversion Imaging, Light Field Distribution, Filtering

Copyright © 2024 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

红外光在宇宙探索、遥感、缺陷检查和医学诊断等方面均具有广泛的应用，因此对于红外光学信息的探测非常重要。近红外连续光泵浦的上转换成像技术运用了和频上转换、准相位匹配理论，将红外照明的图像转换为可见图像，使更多的光学信息为人所用[1]。2012年，丹麦技术大学的 Dam, J.S.等人[2]在室温条件下实现了中红外光谱的频率上转换成像，探测蜡烛的成像信息，在 $3\ \mu\text{m}$ 光谱范围系统的背景噪声为 0.2 光子/空间元素/秒。2014年，华东师范大学周茜等人[3]利用 $1.05\ \mu\text{m}$ 的锁模光纤激光器作为泵浦光源，实现了对 $3.39\ \mu\text{m}$ 少光子水平的中红外波段信号光的探测与成像。紧接着，2015年 A.J. Torregosa 等人[4]利用了 $1550\ \text{nm}$ 的放大自发辐射(ASE)光纤光源作为信号光，不受光源入射角度影响，上转换成像视场显著增加。2017年，黄楠等人[5]利用在窗口波长为 $2.9\ \mu\text{m}$ 到 $3.5\ \mu\text{m}$ 的可调电源的热灯泡的发光非相干中红外图像用于上转换，频率上转换量子效率达到 28%。2022年，Michael Mrejen, 等人[6]设计了一个绝热和频产生(ASFG)晶体，将 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ 的中红外图像上转换为可见近红外图像，最终在 $2\ \mu\text{m}$ 的分辨率是 $28.51\ \text{lp/mm}$ 。同年 Kun Huang 等人[7]提出了一种基于啁啾极化非线性晶体的视场放大方案。在较大的自适应范围内，适当的光栅周期大大提高了入射角的容忍度。接受角度显著扩大到约 30° ，超过 10 倍以上的周期性极化晶体。2023年，Xuanke Zeng 等[8]通过由飞秒涡旋脉冲泵浦的非简并光学参量放大(OPA)增强了 MIR 细节增强成像。该设计可以实现 MIR 成像，空间分辨率高达每毫米 114 线对，光谱范围从 $2.0\ \mu\text{m}$ 到 $3.0\ \mu\text{m}$ 可调。上述文献的研究主要集中在选择不同宽带光源和设计非线性晶体方面提高上转换成像质量，较少研究腔内光场分布对成像的影响和成像的质量优化。腔内上转换系统相比腔外具有更高的功率密度，但结构普遍比较复杂，成本高，调整难度大，这会影响到上转换效率和上转换成像质量。光场分布是影响激光输出性能的重要因素，均匀分布的光场是实现高光束质量激光输出的前提[9]。简易的腔型结构可以更有效地提高上转换效率，改善光束质量。其次，由于连续光泵浦受到噪声的影响，在实验过程中上转换成像会产生高斯噪声。因此本文主要是结合优化腔内结构和成像优化处理，共同提高上转换成像质量。基于柯林斯近似理论和优化的光路传输矩阵，推导了三波光场分布表达式，根据表达式和光路设计，用不同的软件分别模拟了三波光场分布图并进行了对比和分析。通过空域滤波方式优化了实验中会出现的高斯噪声的上转换成像，实现提高成像质量的目标。

2. 理论

柯林斯证明，可以用变换矩阵表征复杂的光学系统[10]。该方法通过将相关的光学传递射线矩阵相乘，

即可找到全系统传输矩阵, 并利用所得出的传输矩阵积分得到成像系统的光场分布情况。

入射光为激光, 其入射光光场分布情况可用下式表示:

$$E_0(x_0, y_0) = \frac{\sqrt{2}}{\omega_0} H_n\left(\frac{\sqrt{2}x_0}{\omega_0}\right) H_m\left(\frac{\sqrt{2}y_0}{\omega_0}\right) \exp\left[-\frac{ik}{2q_0}(x_0^2 + y_0^2)\right] \quad (2-1)$$

上式中, E_0 表示为初始光场, x_0, y_0 表示初始光场的初始位置, H_n 表示 n 阶厄米多项式, H_m 表示 m 阶厄米多项式。 m, n 表示激光模式, 在基模情况下, $m=0, n=0$ 。 q_0 表示入射光的复数曲率半径, 其中, q_0 的大小由束腰半径 ω_0 和波前半径 R_0 决定

$$q_0^{-1} = R_0^{-1} + (2i/k\omega_0^2) \quad (2-2)$$

激光通过复杂光学系统输出光的光场分布情况, 可得:

$$E_N(x_N, y_N) = \exp(ikL_0) \frac{\sqrt{2}}{\omega_N} H_n\left(\frac{x_N}{\omega_N}\sqrt{2}\right) H_m\left(\frac{\sqrt{2}y_N}{\omega_N}\right) \exp\left[\frac{ik}{2q_N}(x_N^2 + y_N^2)\right] \exp[-i\alpha_0(n+m+1)] \quad (2-3)$$

其中,

$$1/q_N = (A + Bq_0)/(C + Dq_0) \quad (2-4)$$

$$\omega_N = \omega_0 C \left[(D/C + 1/R_0)^2 + (2/k\omega_0^2)^2 \right]^{1/2} \quad (2-5)$$

$$\alpha_0 = \tan^{-1} \left(\frac{2}{k\omega_0^2 (D/C + 1/R_0)} \right) \quad (2-6)$$

其中 E_N 表示为输出光场, k 是波矢, $k = 2\pi/\lambda$, L_0 表示光路腔长, q_N, ω_N, α_0 分别表示输出光场的复数曲率半径、激光束腰半径、远场发散角; 它们由 A, B, C, D 传输矩阵因子表示。由此可知, 推导该复杂的光场分布的重点即变成了推导该激光传输方程的传输矩阵。

图 1 是根据模拟稳腔和光斑大小所设计的光路, 基频光的光路为 L 型腔, 信号光的光路为线性腔型, 根据两路的传输矩阵推导基频光和信号光的光场分布表达式。

已知基频光为基膜, 初始光斑 ω_{01} 为 0.2 mm, 根据(2-1)式和(2-2)式推导基频光初始光场表达式如下:

$$E_{01}(x_{01}, y_{01}) = -\frac{\sqrt{2}}{\omega_{01}} \cdot \exp\left[\frac{x_{01}^2 + y_{01}^2}{\omega_{01}^2}\right] \quad (2-7)$$

根据 ABCD 传输矩阵, 计算推导出基频光输出光场表达式为

$$E_{N1}(x_{N1}, y_{N1}) = \exp(5905 * 280i) \cdot \frac{\sqrt{2}}{0.23} \cdot \exp\left[\frac{5905i(x_{N1}^2 + y_{N1}^2)}{2 * 0.00093}\right] \cdot \exp(-i * -1771) \quad (2-8)$$

同理, 信号光初始光斑 ω_{02} 为 1 mm, 其初始光场表达式为

$$E_{02}(x_{02}, y_{02}) = -\frac{\sqrt{2}}{\omega_{02}} \cdot \exp\left[\frac{x_{02}^2 + y_{02}^2}{\omega_{02}^2}\right] \quad (2-9)$$

信号光输出光场表达式为

$$E_{N2}(x_{N2}, y_{N2}) = \exp(4053 * 185i) \cdot \frac{\sqrt{2}}{0.06} \cdot \exp\left[\frac{4053i(x_{N2}^2 + y_{N2}^2)}{2 * 0.0062}\right] \cdot \exp(-i * -192550) \quad (2-10)$$

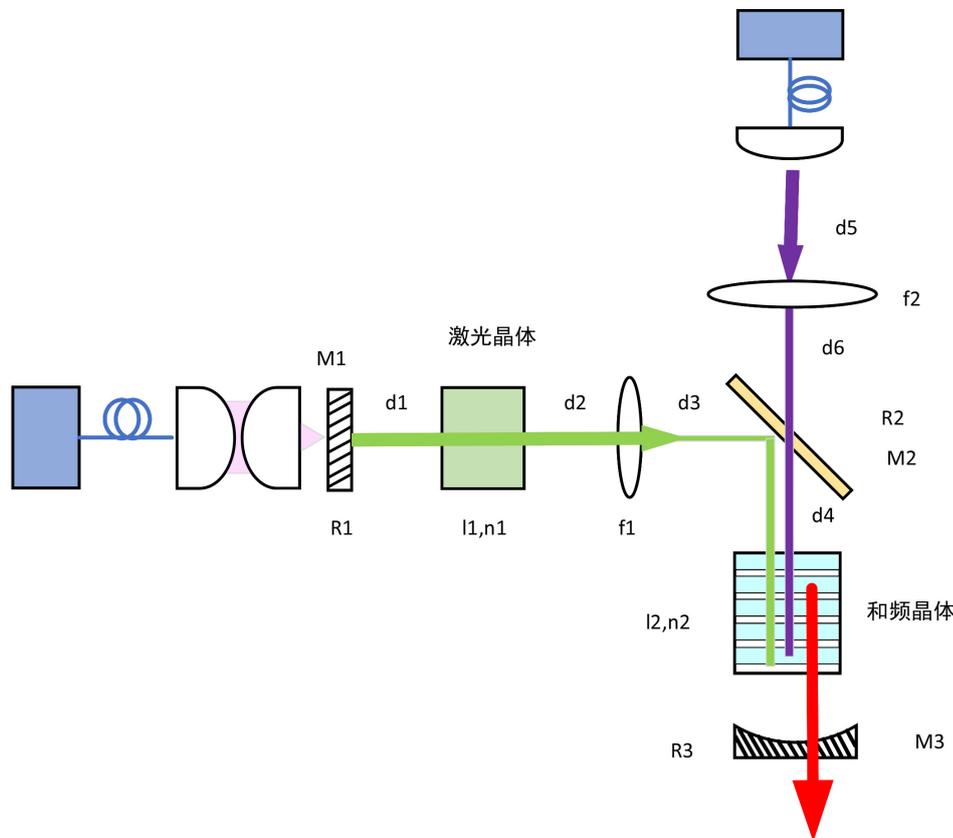


Figure 1. Optical path diagram
图 1. 光路图

现已推导出入射进入和频晶体后的两光源的光场分布 $E_{N1}(x_{N1}, y_{N1})$ 、 $E_{N2}(x_{N2}, y_{N2})$ ，进一步可推导出基频光和信号光的以及和频上转化光强分布函数如下：

$$I_1 = 4.7\sqrt{2}c\epsilon_0 \quad (2-11)$$

$$I_2 = 11.5\sqrt{2}c\epsilon_0 \quad (2-12)$$

$$I_3 = \frac{16 \cdot 20^2 \cdot 53.98 \cdot 27c\epsilon_0^2\pi^2}{0.000631^2 n_3 n_2 n_1} \quad (2-13)$$

式中， n_1 是基频光 1064 nm 在 MgO:PPLN 晶体中的折射率为 2.165， n_2 是信号光为 1550 nm 在 MgO:PPLN 晶体中的折射率为 1.38， n_3 是和频光为 631 nm 在 MgO:PPLN 晶体中的折射率为 2.23， c 是光速， ϵ_0 是介电常数。

3. 成像仿真

根据推导的光强分布表达式，设定输入信号光功率为 1 W，输入泵浦光功率为 1 W，运用 Matlab 软件分别模拟晶体中的基频光，信号光和和频光的光强分布图。

从图 2~4 中，可得知当基频光，信号光为高斯光时，上转换后和频光也是高斯光束。

根据光路图，使用仿真软件 Zemax 软件模拟对其进入和频晶体后的光强分布图，设定输入信号光功率为 5 W，输入泵浦光功率为 5 W，分别模拟信号光，基频光以及和频光的光强分布，分别如图 5~7 所示。

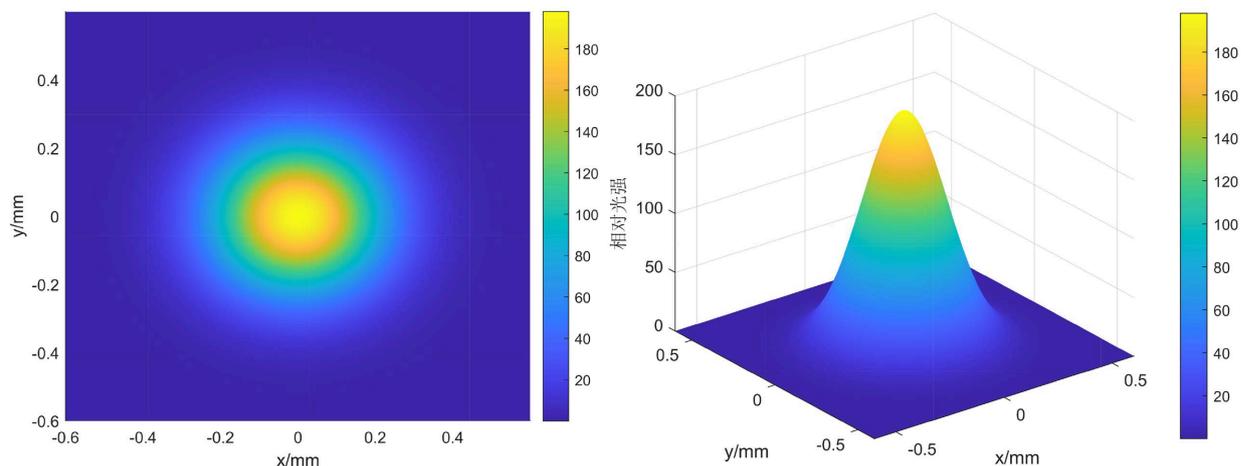


Figure 2. Simulation of intensity distribution of fundamental frequency light
图 2. 基频光的光强分布模拟

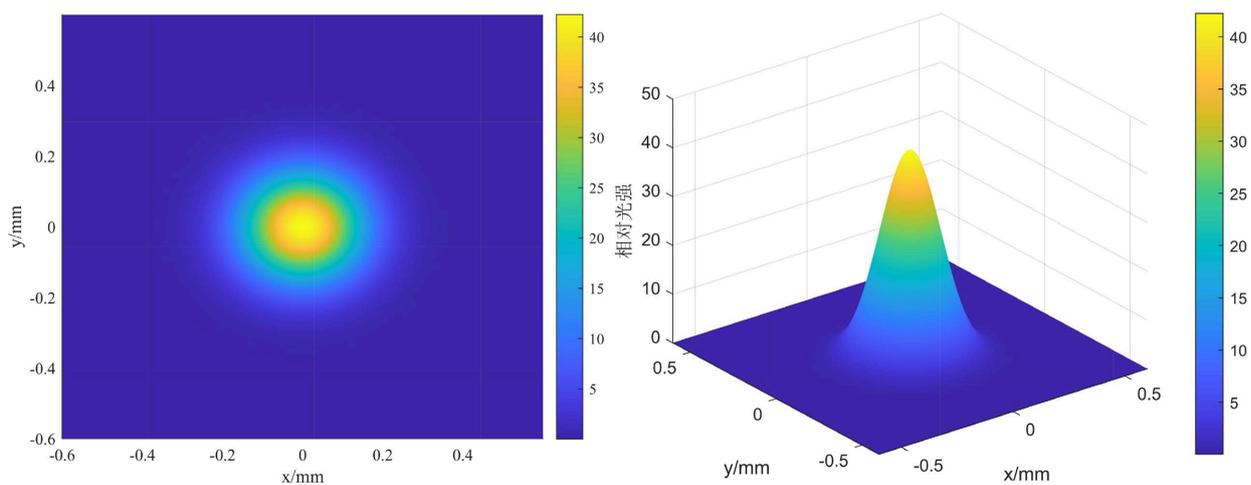


Figure 3. Simulation of intensity distribution of signal light
图 3. 信号光的光强分布模拟

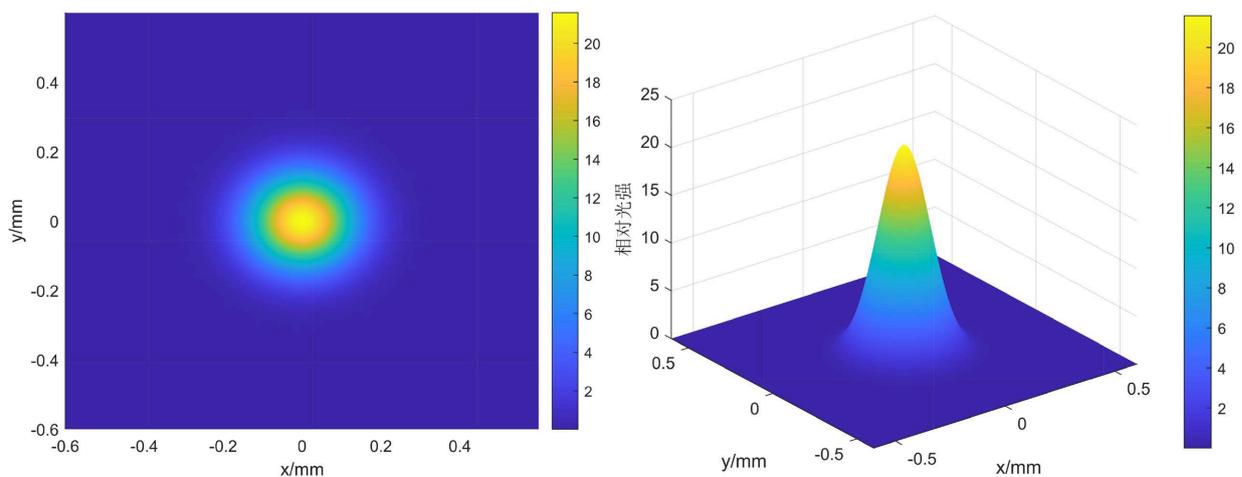


Figure 4. Simulation diagram of intensity distribution of sum frequency light
图 4. 和频光的光强分布模拟图

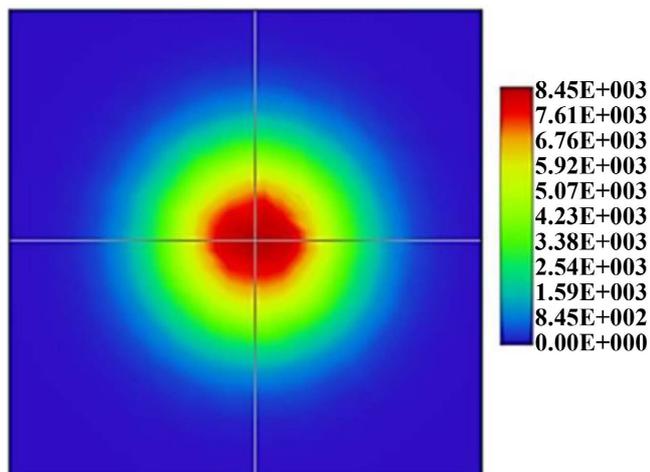


Figure 5. Simulation diagram of fundamental frequency light intensity distribution
图 5. 基频光光强分布模拟图

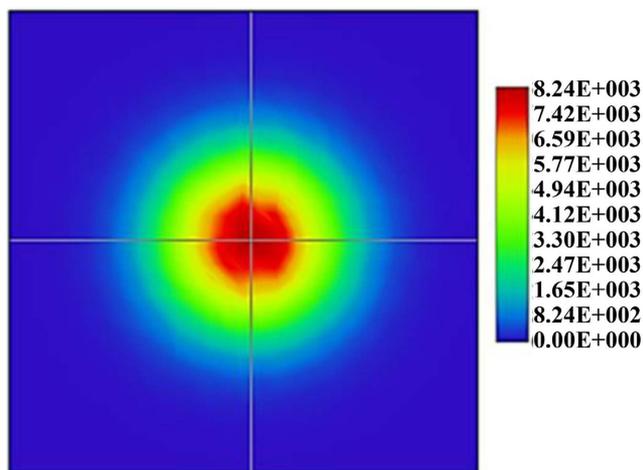


Figure 6. Simulation diagram of signal light intensity distribution
图 6. 信号光光强分布模拟图

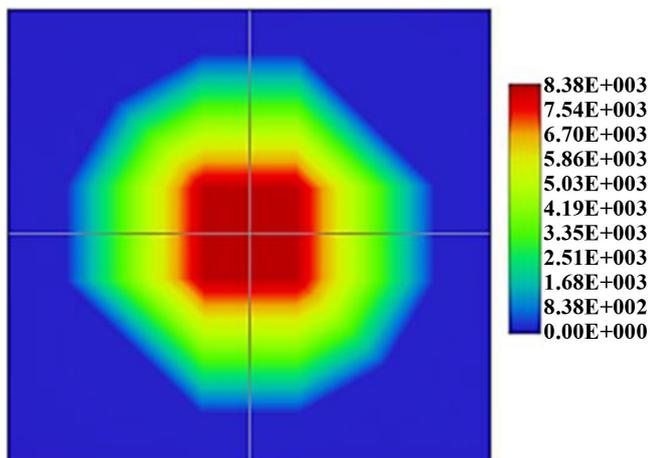


Figure 7. Simulation diagram of frequency light intensity distribution
图 7. 和频光光强分布模拟图

图 5~7 中, 辐射强度的单位为瓦特/球面度, 右侧表示其辐射强度数值的图例。可以看出基频光和信号光光斑图像近似为正圆形, 光斑的中心强度随径向半径增加而依次减小。看图 7 上转换后的图像, 可以看出该图像中心近似为矩形, 与信号光、泵浦光中心的圆形光斑之间存在差异。分析造成其可能的原因在于晶体选择了矩形体对光斑形状造成了影响, 致使图像边缘线性化。

对比两个软件模拟的光强分布, 三束光都为高斯光束。依据光路图利用 Zemax 模拟光强分布图, 依据光强表达式利用 Matlab 软件模拟光强分布图, 由于模拟依据不同, 光强有不同的大小。光强分布的模拟为下一步实验过程中提高光束质量和优化抽运结构提供理论依据。

4. 成像优化

近红外上转换成像实验中, 首先光电传感器本身存在一定的电子噪声和热噪声, 这些噪声在信号采集过程中可能表现为高斯分布的白噪声。其次激光成像系统中使用的光源可能会存在一定程度的不稳定性, 例如光强波动、频率漂移等, 这些不稳定性也可能导致成像过程中引入高斯白噪声路中的各种干扰; 另外, 激光成像系统的光路中可能会受到各种干扰, 例如光学元件的表面粗糙度、杂散光的影响、光学系统的折射、反射等。这些干扰在信号采集过程中可能会表现为随机性的噪声, 部分情况下符合高斯白噪声的特性; 最后在信号处理和放大过程中, 电子元件本身的噪声以及放大器的非线性都可能导致高斯白噪声的产生。为了降低这些对成像的影响, 我们通过空间域增强方式来处理改善图像的视觉效果, 常见的空间域增强方法包括灰度变换、滤波、边缘检测等。我们主要采用滤波的方式改善成像质量。

首先使用 Matlab 软件仿真实验可能出现的噪声情况。将模拟的和频光的光强分布的灰度图作为参考, 同时计算出其直方图, 分析灰度直方图, 可以直观看出该图的对比度, 亮度以及噪点。如下。直方图 x 轴为像素值范围, y 轴为像素值的个数。

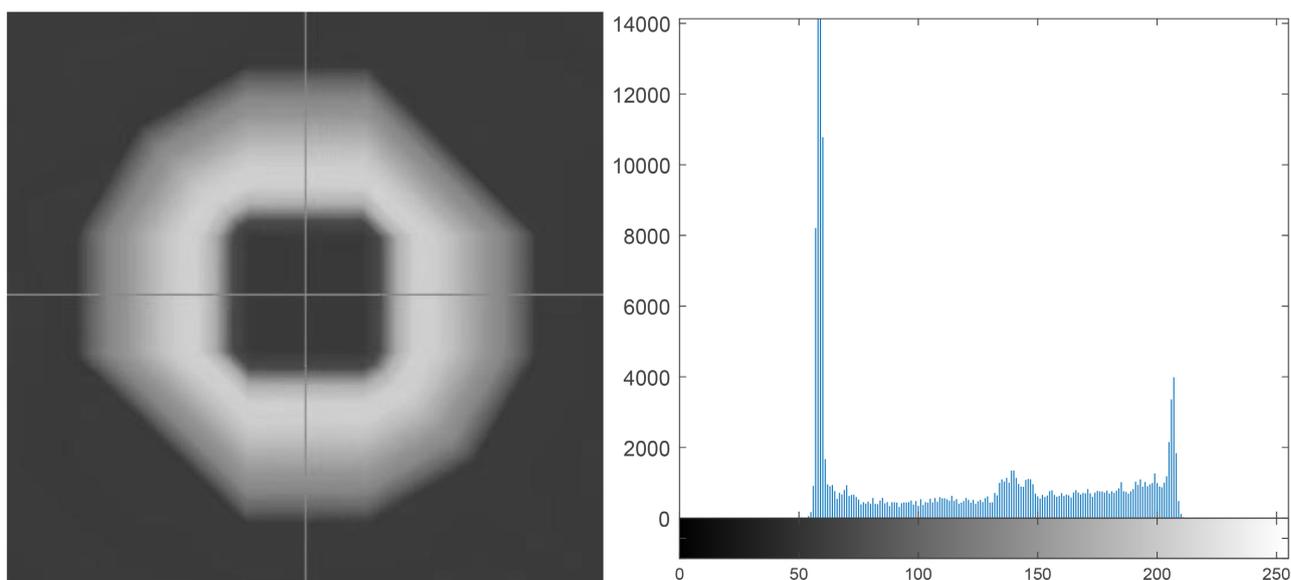


Figure 8. Grayscale image and its histogram

图 8. 灰度图与其直方图

如图 8 灰度图的直方图, 像素值主要分布范围在 56 到 206 之间, 表示其均匀性, 范围越广, 越均匀。各个像素尽可能均匀分布或者服从一定形式的分布, 尖峰多表示对比度高, 然后仿真实验中出现的高斯白噪声, 如图 9。

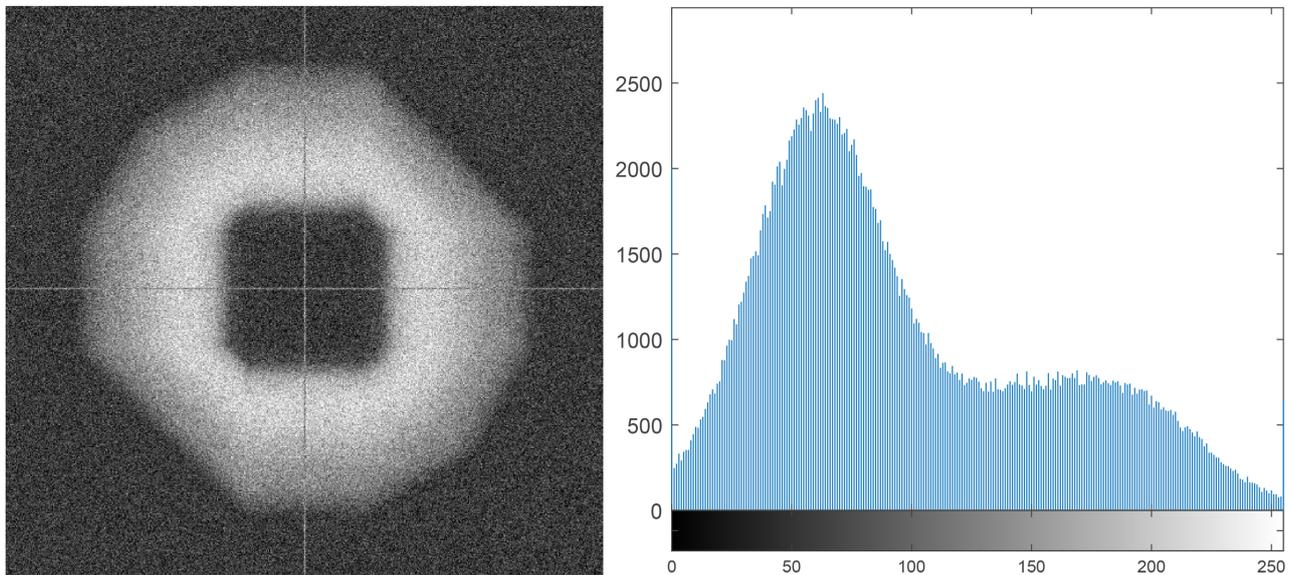


Figure 9. Gaussian white noise and its histogram
图 9. 高斯白噪声与其直方图

如图 9 高斯白噪声的直方图出现大量距离峰值较远的零散像素，则表示存在噪点或者失真。这些噪点和失真会影响到图像的细节和质量，所以需要优化图像质量。常用的数字图像处理方法包括[11]均值滤波、中值滤波和高斯滤波。以高斯白噪声为例，用三种滤波方式对图像进行平滑处理或去噪声，增强图像。

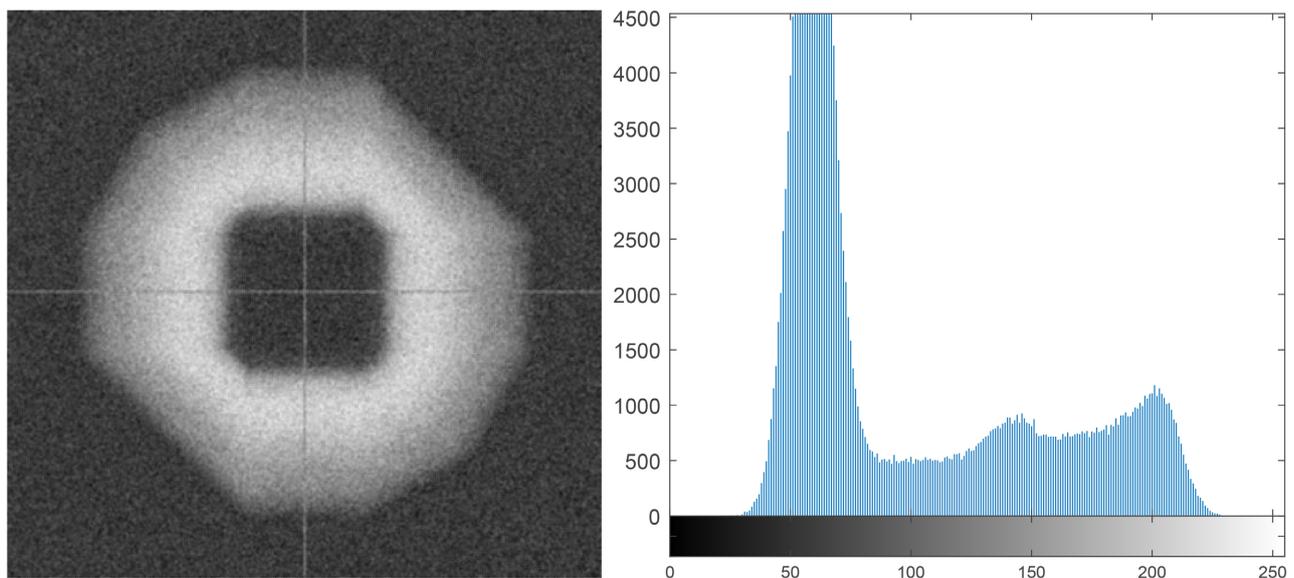


Figure 10. Mean filtering and its histogram
图 10. 均值滤波与其直方图

从图 10 的均值滤波的直方图中看出，像素值主要分布范围在 39 到 222 之间。
从图 11 的中值滤波的直方图中看出，像素值主要分布范围在 31 到 225 之间。
从图 12 中高斯滤波的直方图中看出，像素值主要分布范围在 48 到 208 之间。

通过对三种方式滤波模拟，对比图 10~12 中的直方图，中值滤波的直方图范围较广，有多个峰值，表示图像包含更丰富的灰度信息，所以中值滤波效果最好，但三者的对比度较低。之后通过灰度变换增强的直方图均衡化增强中值滤波图像的对比度，使图像中各个像素尽可能均匀分布或者服从一定形式的分布，从而提高图像对比度[12]。空间域增强包括图像增强和降噪滤波，是指对图像在像素空间范围内进行处理，通过对像素值的变换和滤波来改善图像的视觉效果，提高图像质量。

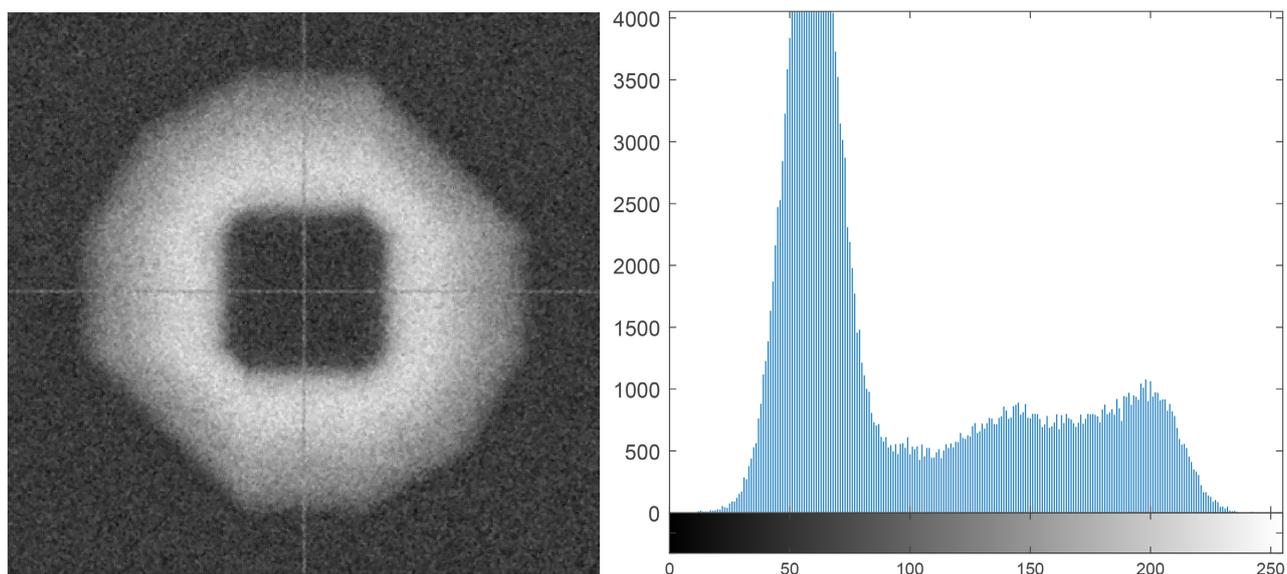


Figure 11. Median filtering and its histogram

图 11. 中值滤波与其直方图

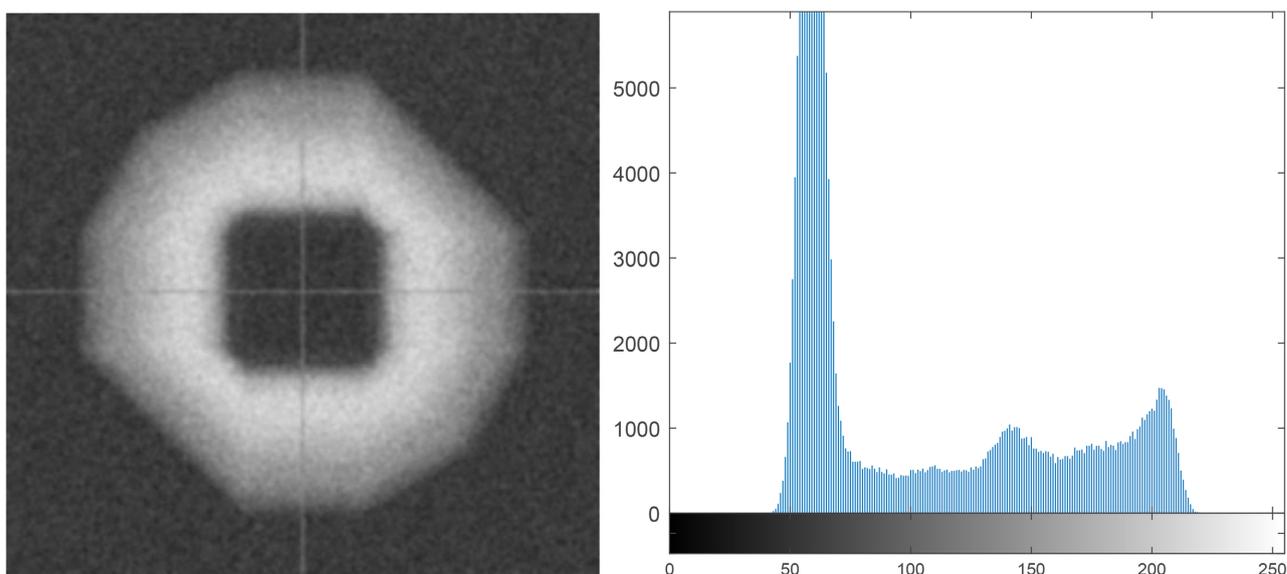


Figure 12. Gaussian filter and its histogram

图 12. 高斯滤波与其直方图

图 13 是直方图的均衡化后的图像，相比中值滤波图像对比度增强，细节更清晰。因此，使上转换图像达到更好的可视化效果。

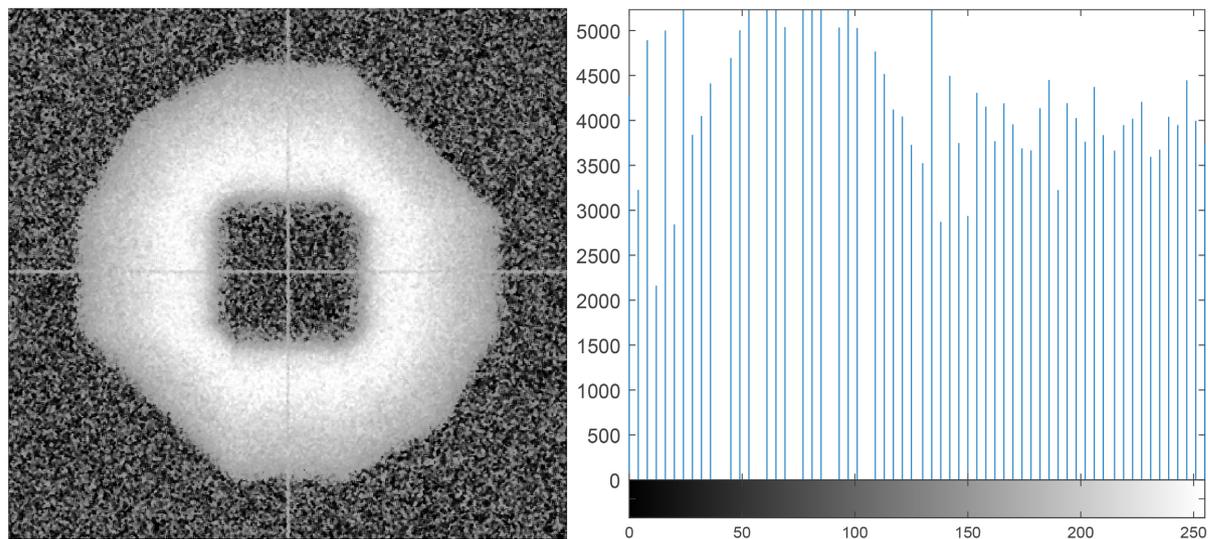


Figure 13. Histogram balanced image and its histogram

图 13. 直方图均衡化的图像与其直方图

5. 总结

本文结合柯林斯近似理论和光路设计，推导了基频光和信号光以及和频光光强分布表达式，并分别用 Matlab 软件及 Zemax 软件模拟了三波光强分布图像，两个模拟结果一致，基频光和信号光为高斯光束，则上转换光也是高斯光束。在 Zemax 软件模拟的和频光光强分布图上，增加了高斯白噪声，通过均值滤波，中值滤波和高斯滤波方式减少上转换成像中的图像噪声，对比分析了三种滤波方式后图像以及灰度图，发现中值滤波方式最佳。进一步通过直方图的均衡化方式加强图像分辨率，最终实现提高成像质量的目标。结果表明：通过优化谐振腔和空域滤波方式处理成像图像可以提高上转换成像质量。

参考文献

- [1] 赵令伟, 刘磊, 华卫红. 基于非线性频率上转换的红外成像技术研究[J]. 无线电工程, 2020, 50(6): 452-459.
- [2] Dam, J.S., Tidemand-Lichtenberg, P. and Pedersen, C. (2012) Room-Temperature Mid-Infrared Single-Photon Spectral Imaging. *Nature Photonics*, **6**, 788-793. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.231>
- [3] 周茜. 基于非线性频率上转换的中红外波段少光子探测及成像[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [4] Torregrosa, A.J. (2015) Intra-Cavity Upconversion to 631 nm of Images Illuminated by an Eye-Safe ASE Source at 1550 nm. *Optics Letters*, **40**, 5315-5318. <https://doi.org/10.1364/OL.40.005315>
- [5] Huang, N., Liu, H.J., Wang, Z.L., et al. (2017) Femtowatt Incoherent Image Conversion from Mid-Infrared Light to Near-Infrared Light. *Laser Physics*, **27**, Article ID: 035401. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/aa57db>
- [6] Mrejen, M., Erlich, Y., Levanon, A. and Suchowski, H. (2020) Multicolor Time-Resolved Upconversion Imaging by Adiabatic Sum Frequency Conversion. *Laser & Photonics Reviews*, Article ID: 2000040. <https://doi.org/10.1002/lpor.202000040>
- [7] Huang, K., Fang, J., Yan, M., et al. (2022) Wide-Field Mid-Infrared Single-Photon Upconversion Imaging[J]. *Nature Communications*, **13**, 101. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28716-8>
- [8] Zeng, X., Wang, C., Wang, H., et al. (2023) Tunable Mid-Infrared Detail-Enhanced Imaging with Micron-Level Spatial Resolution and Photon-Number Resolving Sensitivity. *Laser & Photonics Reviews*, **17**, 12. <https://doi.org/10.1002/lpor.202200446>
- [9] 姜乃方. LDA 侧面抽运棒状介质的光场分布模拟及效果评估[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2012.

-
- [10] Collins, S.A. (1970) Lens-System Diffraction Integral Written in Terms of Matrix Optics. *Journal of the Optical Society of America*, **60**, 1168. <https://doi.org/10.1364/JOSA.60.001168>
- [11] 陈建楷. 基于视觉引导的手机指纹模组自动装配研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [12] 李娜. 基于数学形态学的藻类图像去噪算法研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.