

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

宽频消色散超表面全息成像

李瑞琛, 邹毅军, 陈天航, 郑斌, 蔡通

引用本文:

李瑞琛, 邹毅军, 陈天航, 等. 宽频消色散超表面全息成像[J]. *光电工程*, 2023, 50(8): 230118.

Li R C, Zou Y J, Chen T H, et al. Broadband achromatic metasurface holography[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 230118.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230118>

收稿日期: 2023-05-19; 修改日期: 2023-08-23; 录用日期: 2023-08-23

相关论文

Time-sequential color code division multiplexing holographic display with metasurface

Xin Li, Qinmiao Chen, Xue Zhang, Ruizhe Zhao, Shumin Xiao, Yongtian Wang, Lingling Huang

Opto-Electronic Advances 2023, 6(8): 220060 doi: [10.29026/oea.2023.220060](https://doi.org/10.29026/oea.2023.220060)

Crosstalk-free achromatic full Stokes imaging polarimetry metasurface enabled by polarization-dependent phase optimization

Yaxin Zhang, Mingbo Pu, Jinjin Jin, Xinjian Lu, Yinghui Guo, Jixiang Cai, Fei Zhang, Yingli Ha, Qiong He, Mingfeng Xu, Xiong Li, Xiaoliang Ma, Xiangang Luo

Opto-Electronic Advances 2022, 5(11): 220058 doi: [10.29026/oea.2022.220058](https://doi.org/10.29026/oea.2022.220058)

Recent advances in optical dynamic meta-holography

Hui Gao, Xuhao Fan, Wei Xiong, Minghui Hong

Opto-Electronic Advances 2021, 4(11): 210030 doi: [10.29026/oea.2021.210030](https://doi.org/10.29026/oea.2021.210030)

基于片上超表面的多路方向复用全息术

杨睿, 于千茜, 潘一苇, 陈思涵, 张宸, 叶宏, 周鑫尧, 时阳阳, 万帅, 刘阳, 李仲阳

光电工程 2022, 49(10): 220177 doi: [10.12086/oe.2022.220177](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220177)

更多相关论文见光电期刊集群网站 

 **光电工程**
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



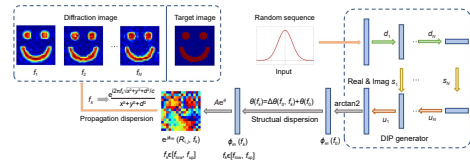
 OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.230118

宽频消色散超表面全息成像

李瑞琛^{1†}, 邹毅军^{1†}, 陈天航^{2*}, 郑斌^{1*}, 蔡通^{3*}¹浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027;²中国航空研究院, 北京 100029;³空军工程大学, 陕西 西安 710100

摘要: 针对超表面全息成像技术中存在的问题, 本文提出了消色散宽频超表面全息成像优化原理及模型, 提出了基于深度图像先验的深度学习网络模型用于单目标的被动式超表面全息图设计, 实现了消色散宽频超表面全息成像。数值仿真和实验结果均证明, 所设计的全息成像器件可以在 9 GHz~11 GHz 频段内实现良好的消色散成像效果, 在全息成像、宽频功能器件设计等领域具有极大的应用潜力。

关键词: 全息成像; 超表面; 消色散

中图分类号: O438.1

文献标志码: A

李瑞琛, 邹毅军, 陈天航, 等. 宽频消色散超表面全息成像 [J]. 光电工程, 2023, 50(8): 230118

Li R C, Zou Y J, Chen T H, et al. Broadband achromatic metasurface holography[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 230118

Broadband achromatic metasurface holography

Li Ruichen^{1†}, Zou Yijun^{1†}, Chen Tianhang^{2*}, Zheng Bin^{1*}, Cai Tong^{3*}¹ College of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;² Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China;³ Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710100, China

Abstract: Aiming at the problems of narrow working frequency band and low near field imaging efficiency in metasurface holographic imaging technology, this paper proposed the principle and model of optimization of achromatic broadband metasurface hologram imaging. A deep learning network model based on the depth image prior (DIP) is proposed for single-target passive metasurface hologram design, and achromatic broadband metasurface hologram imaging is achieved. Numerical simulation and experimental results have proved that the designed holographic imaging device can achieve good achromatic imaging effect in the 9 GHz~11 GHz frequency band, and has great potential application in the field of holographic imaging and broadband functional device design.

Keywords: holographic imaging; metasurface; achromatic

1 引言

全息成像技术是近代光学领域的一个重要分支^[1]。

不同于普通相机只记录物体的光强信息, 全息成像技术记录了被拍摄物体散射的物光波振幅、相位和极化等信息, 即全息图。在特定光照条件下, 全息图可以

收稿日期: 2023-05-19; 修回日期: 2023-08-23; 录用日期: 2023-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62071423)

*通信作者: 陈天航, greendam@zju.edu.cn; 郑斌, zhengbin@zju.edu.cn; 蔡通, caitong@zju.edu.cn。

†同等贡献作者

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

还原出物体的全部信息, 观察者可以看到被拍摄物体的不同角度, 从而产生立体视觉。计算全息技术通过计算机强大的运算处理能力数字化了整个全息过程^[2-3], 使得整个全息记录和再现过程计算起来更加方便灵活。相比于传统的光学全息技术, 计算全息技术不会引入相差和噪声, 并且脱离了光源的限制, 可以实现真实或虚拟物体的显示, 显著扩大了全息成像技术的应用范围。在微波频段, 全息成像技术通常借助于超表面来实现。由于其优秀的调控特性^[4-11], 超表面非常适合作为全息图的编码材料^[12-17], 超表面与全息成像技术的结合也成为当前纳米技术、光学、电磁学的研究热点之一。相比于传统的全息成像技术, 超表面亚波长的单元结构, 可以有效地消除不需要的衍射阶数, 提供高分辨率、高精度、低噪声的重建图像, 极大地改善了全息图像的成像质量^[18-22]。

色散(又称色差)是电磁波领域一个普遍但十分重要的现象, 几乎所有电磁波调控器件的性能都与色散相关。对于全息成像器件, 色散会降低成像的分辨率, 严重影响成像的质量, 因此如何降低色散影响是宽频全息成像器件设计中重要部分之一。全息成像器件按色散效应的不同可分为两类: 折射型全息成像器件和衍射型全息成像器件, 折射型全息成像器件如透镜^[23]等, 电磁波的偏转角度随波长增大而减小; 衍射型全息成像器件如光栅^[24]等, 电磁波的偏转角度随波长增大而增大。超表面全息成像器件属于衍射型全息成像器件, 色散效应从两个方面影响了其成像质量: 一方面空间色散导致了不同波长在相同传播距离下的累积相位不同, 另一方面结构色散导致了不同波长对相同超表面结构的电磁特性不同。因此, 当波长出现偏移, 超表面全息成像器件的成像质量急剧下降, 严重影响其宽频应用潜力。

本文讨论了超表面全息成像器件的色散原因及优

化原理, 提出了基于深度图像先验^[25]的消色差宽频超表面全息成像器件设计方法, 设计了一个工作频段 9 GHz~11 GHz 的消色差宽频超表面全息成像器件, 并通过仿真和实验结果验证了该方法的有效性。实验证明, 该全息成像器件在 9 GHz~11 GHz 具有良好的消色差效果。

2 宽频消色差成像理论

2.1 理论分析

入射波经由超表面全息成像器件调制后的波前电场分布决定了成像面上的电场分布。当平面波垂直入射时, 成像面上第 m 行第 n 列像素点的电场 $E_{m,n}$ 可表示为

$$E_{m,n} = \sum_{i,j} A_{\text{Meta}} e^{i(\phi_c(r,\lambda) + \phi_{\text{Meta}}(r,\lambda))}, \quad (1)$$

其中, A_{Meta} 、 $\phi_{\text{Meta}}(r,\lambda)$ 分别表示超表面单元对入射平面波的振幅调控和相位调控, $\phi_c(r,\lambda)$ 表示超表面单元到像素点的传播累积相位:

$$\phi_c = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot |r|, \quad (2)$$

其中, r 表示超表面单元到像素点之间的距离。从上述公式可知, 像素点电场 $E_{m,n}$ 的大小与波长 λ 相关, 即色散效应。当超表面全息成像器件偏离工作频率, 成像面上的电场分布发生变化, 从而影响成像质量。

本文使用 GS 算法来描述色散效应对成像器件的影响。如图 1 所示, 成像目标为笑脸图案(图 1(a)), 目标工作频率为 10 GHz, 成像距离为 150 mm, 图 1(d) 为工作频率下超表面成像器件的重建像, 可以看出, 该全息成像器件在其工作频率下成像效果良好。当偏离工作频率时, 重建像被部分破坏(图 1(c) 和图 1(e))。需要说明的是, 该数值结果仅考虑了传播色散影响而未考虑超表面单元的结构色散影响, 结构

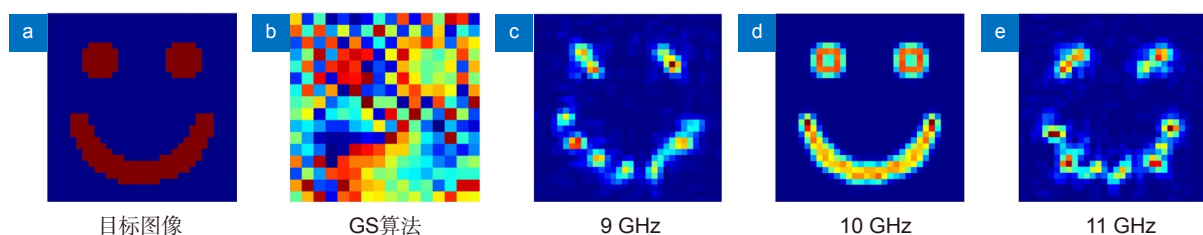


图 1 色散效应对成像器件的影响。(a) 成像目标; (b) 全息相位分布; (c-e) 9 GHz, 10 GHz, 11 GHz 的重建像

Fig. 1 Dispersion effects on imaging devices. (a) Imaging targets; (b) Holographic phase distribution; (c-e) Reconstruction images at 9 GHz, 10 GHz, and 11 GHz

色散特性往往具有不规则性, 成像效果将被进一步破坏。

针对宽频消色散全息成像理论, 本文中仅讨论超表面单元对入射的相位调控, 即 $A_{\text{Meta}} = 1$, 设中心频率为 f_0 , 成像距离为 d , 满足宽频带全息成像需求的第 i 行第 j 列超表面单元附加相位为 $\phi_{i,j}$, 设结构色散引起的偏移相位为 $\Delta\phi(\phi_{i,j}, f - f_0)$, 第 i 行第 j 列超表面单元到成像面上第 m 行第 n 列像素点的距离 $r = \sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_n - y_j)^2 + d^2}$, 则式 (1) 可改写为

$$E_{m,n} = \sum_{i,j} e^{\phi_{i,j} + \Delta\phi(\phi_{i,j}, f - f_0) + \frac{2\pi f}{c} \sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_n - y_j)^2 + d^2}} \quad (3)$$

由此可见, 消色散宽频全息成像问题可以简化成关于中心频率 f_0 的附加相位 $\phi_{i,j}$ 在频带内的优化问题, 即检索满足频带内成像需求的 $\phi_{i,j}$ 序列。

2.2 深度学习网络模型构建

本文设计了一种基于深度图像先验 (depth image priors, DIP)^[21] 的宽频消色散超表面全息成像网络模型结构。传统的图像去模糊问题的优化项可表示为

$$\min \|B * I + N - I_{\text{Blurring}}\|_2^2 + p(I) \quad (4)$$

DIP 利用深度卷积网络模型捕获到的隐式先验条件代替了图像先验条件 $p(I)$, 式 (4) 变为

$$\arg \min \|B * f_\theta(z) + N - I_{\text{Blurring}}\|_2^2, I = f_\theta(z) \quad (5)$$

其中: z 表示深度卷积网络模型的输入, θ 表示深度卷积网络模型参数, $f_\theta(z)$ 表示深度卷积网络模型的输出。对比式 (4)、(5) 可知, 传统优化式 (4) 将潜在图像直接作为解空间, 因此需要设计一个有效的图像先验条件使得深度学习网络模型趋向于生成干净的原始图像, 而式 (5) 中构造了一个深度卷积网络模型生成潜在图

像, 通过调整深度卷积网络模型参数来获得干净原始图像, 此时深度卷积网络模型参数作为一个隐式先验条件代替了图像先验条件, 那么基于深度图像先验条件的消色散宽频全息成像的优化项可表示为

$$\arg \theta \sum_{f=f_0}^{f_u} [\min \| \text{abs}(\text{coeff}_{\text{ray}} * e^{\phi_{\text{Meta}} + \frac{\pi}{\delta}(f-f_0)})^2 - I_{\text{Truth}} \|_2^2, \phi_{\text{Meta}} = f_\theta(z) \quad (6)$$

式中, 首先构造了一个深度卷积网络模型用于生成中心频率 f_0 的待优化附加相位序列 ϕ_{Meta} , 然后基于色散偏移相位关系求出频带内其他频点的附加相位序列, 再通过瑞利-索末菲衍射公式计算频带内各个频点的超表面全息图的重建像, 最后基于重建像与目标图像的均方误差 (MSE) 对深度卷积网络模型的参数进行更新。基于深度图像先验的网络模型结构具有以下优点: 1) 深度先验条件避免了人工设计, 提供了巨大的便利性。2) 传统的深度学习去模糊算法需要大量的样本数据 (Data: 目标成像, Label: 对应的超表面全息图) 用于深度学习网络模型的训练, 而深度图像先验条件的核心在于构建输入 z 到输出 ϕ_{Meta} 的深度卷积网络映射模型, 因此可采用固定随机数组加微小扰动的方式构建一个输入数据集, 成像目标与输入数据集相互独立, 因此可以实现单目标成像的优化。

本文所设计的基于深度图像先验的宽频消色散超表面全息成像网络模型如图 2 所示, 首先基于 U-Net 结构的深度卷积网络模型生成实部特征向量和虚部特征向量, 再利用反三角函数间接生成范围 $[-\pi, \pi]$ 的相位特征向量, 以解决相位周期性产生断点对网络模型训练的影响。考虑到超表面单元之间的耦合效应, 超表面相邻的四个单元共用同一附加相位, 本例中超表

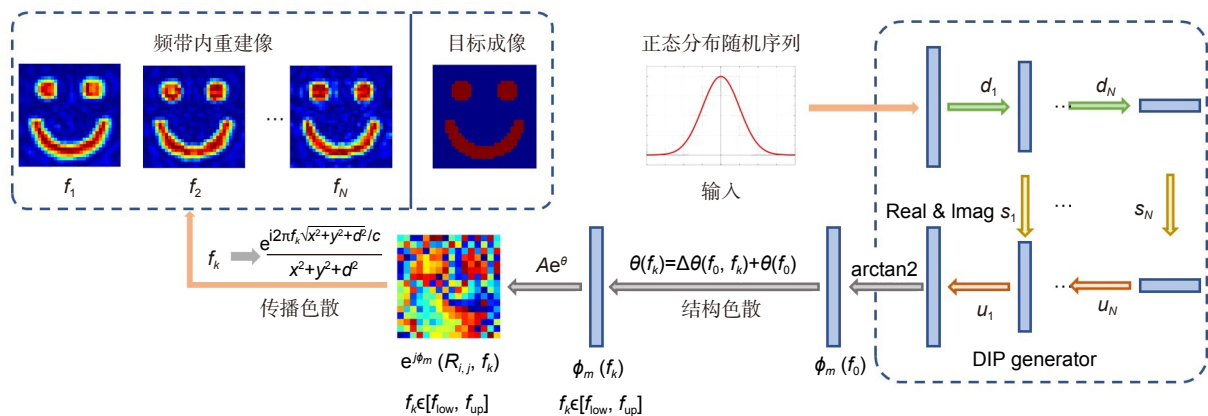


图 2 基于深度图像先验 (DIP) 的宽频消色散超表面全息成像网络模型结构

Fig. 2 A broadband dispersion metasurface holographic imaging network model based on the depth image priors (DIP)

面全息成像器件与成像面处的采样点数均为 [32, 32], 因此深度卷积网络模型输出为维度 [16*16, 1] 的相位特征向量。在超表面层中, 相位特征向量 ϕ_{Meta} 首先被重构为维度 [16,16] 的二维相位特征向量, 然后通过超表面结构色散偏移相位关系生成频带 $[f_l, f_u]$ 内所有频点的超表面全息图。在衍射层中, 通过瑞利-索末菲衍射公式计算频带 $[f_l, f_u]$ 内超表面全息图所有频点的重建像, 成像距离为 150 mm。

选用均方误差 (MSE) 作为损失函数 Loss (公式中写作 L_{Loss}), 如式 (7) 所示:

$$L_{\text{Loss}} = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (I_{\text{Output}}(f_n, m) - I_{\text{Target}}(f_n, m))^2. \quad (7)$$

损失函数 Loss 值变化曲线如图 3 (a) 所示。0~2500 次迭代时, Loss 值快速下降, 网络模型快速收敛。2500 次迭代之后, Loss 值下降放缓, 网络模型收敛趋于平稳。15000 次迭代后, Loss 值基本不变, 网络模型完成收敛。图 3(b) 为不同迭代次数下神经网络

输出的数值重建像, 可以看出, 经过 1000 次迭代时, 成像目标已显示大致轮廓, 10000 次迭代以后, 成像质量无明显提高。

3 仿真及实验验证

3.1 超表面单元设计

本文采用反射交叉极化单元作为示例完成对理论算法模型的验证。所设计的反射型交叉极化旋转超表面单元如图 4(a) 所示, 超表面单元由介质基板和两层金属层结构组成, 单元周期长度 $p = 10 \text{ mm}$, 介质基板 (FR4) 厚度 $h = 4 \text{ mm}$, 相对介电常数 $\epsilon_r = 2.65$, 损耗正切角 $\tan \sigma = 0.01$, 金属层选用铜, 底部金属层为反射电磁波的金属板。顶部金属结构如图 4(b) 所示, 为 45° 倾斜的外圈半径为 r 的双开口环形结构, 内圈开口环半径为 $r - d$ ($d = 2 \text{ mm}$), 双开口环开口张角为 α , 双开口环的倾斜角度为 β , 两开口环通过金属线连接, 宽度为 $w = 0.8 \text{ mm}$ 。

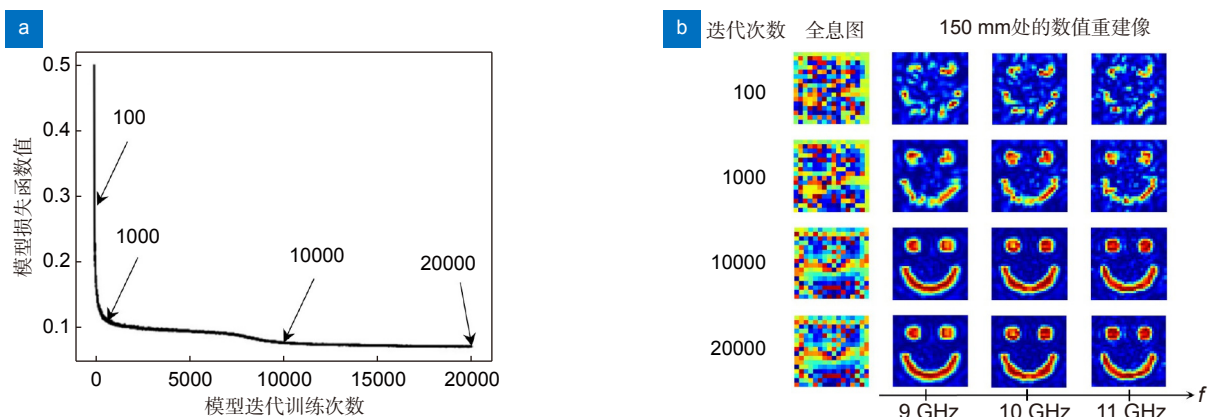


图 3 网络训练过程。(a) 网络训练 Loss 值随迭代次数的变化; (b) 不同迭代次数下网络输出的数值重建像
Fig. 3 Network training process. (a) The change of network training loss value with the number of iterations; (b) Numerical reconstruction image outputs by the network under different iterations

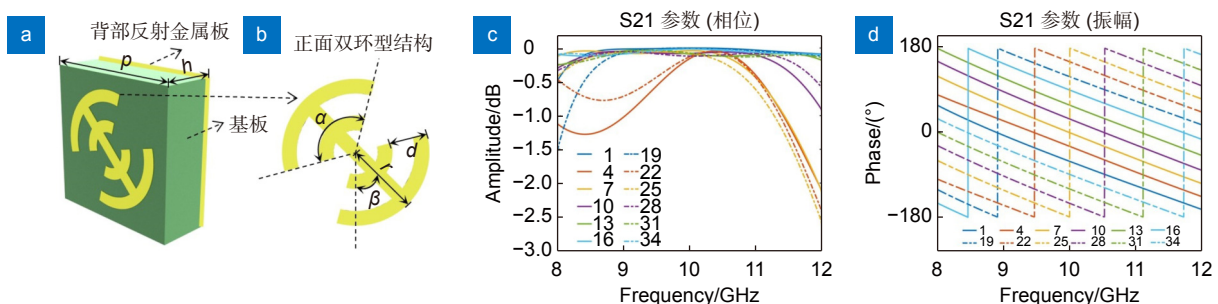


图 4 反射型交叉极化旋转超表面的单元结构。(a) 交叉极化转化单元的三维示意图; (b) 顶层金属结构; (c) 和 (d) 单元的极化转化效率和相位

Fig. 4 Reflective cross-polarized rotational metasurface element. (a) Three-dimensional schematic diagram of the cross-polarization conversion unit; (b) Top-floor metal structure; (c) and (d) Polarization conversion efficiency and phase

分析超表面单元的交叉极化电磁特性 (S21 参数), 如图 4(c) 所示。该反射型交叉极化旋转超表面单元在 9 GHz~11GHz 的交叉极化转换率达到了 99%。这是因为超表面单元的三层结构组成了一个“类法布里-珀罗”谐振腔, 在谐振器内同极化电磁波相互抵消、交叉极化电磁波相互叠加, 产生了高效的极化转化率。此外, 超表面单元交叉极化反射波的附加相位与开口

环角度 α 和外环半径 r 的大小相关。如图 4(d) 所示, 当双开口环倾斜角度为 $\beta = 45^\circ$ 时, 通过调整 α 和 r 可实现 180° 的附加相位, 根据镜像原理, 当双开口环倾斜角度为 $\beta = -45^\circ$ 时可提供额外的 180° 附加相位, 因此该超表面单元的附加相位可覆盖 $[-\pi, \pi]$ 的范围, 完全满足超表面全息成像器件的相位调控需求。所设计的超表面单元的具体参数如表 1 所示。相比于同极化

表 1 不同超表面单元的结构参数和反射相位

Table 1 Structural parameters and reflected phases of different elements

单元序号	开口环角度 $\alpha/^\circ$	开口环倾斜角度 $\beta/^\circ$	外环半径 r/mm	内环半径 $(r-d)/\text{mm}$	相位/ $^\circ$		
					9 GHz	10 GHz	11 GHz
1	82	45	3.6	1.6	5.32	-60.68	112.63
2	73	45	3.6	1.6	5.79	-49.91	101.65
3	64	45	3.6	1.6	16.82	-39.63	91.43
4	157	-45	4.16	2.16	25.56	-28.75	83.46
5	157	-45	4.02	2.02	35.41	-19.46	74.09
6	157	-45	3.88	1.88	45.82	-10.04	64.85
7	157	-45	3.74	1.74	57.70	0.42	54.89
8	157	-45	3.6	1.6	70.00	11.04	45.12
9	151	-45	3.6	1.6	77.51	19.07	36.65
10	145	-45	3.6	1.6	87.76	29.59	25.60
11	138	-45	3.6	1.6	98.48	40.51	14.18
12	131	-45	3.6	1.6	107.35	49.66	4.56
13	125	-45	3.6	1.6	116.53	59.03	5.10
14	118	-45	3.6	1.6	127.03	69.80	16.11
15	112	-45	3.6	1.6	136.64	79.79	26.31
16	104	-45	3.6	1.6	147.56	91.23	38.08
17	98	-45	3.6	1.6	154.69	98.74	45.95
18	90	-45	3.6	1.6	164.79	109.25	56.89
19	82	-45	3.6	1.6	174.90	119.50	67.52
20	73	-45	3.6	1.6	174.08	130.20	78.45
21	64	-45	3.6	1.6	163.15	140.39	88.57
22	157	45	4.16	2.16	154.45	151.21	96.47
23	157	45	4.02	2.02	144.55	160.58	105.95
24	157	45	3.88	1.88	135.05	169.00	114.11
25	157	45	3.74	1.74	122.31	179.61	125.10
26	157	45	3.6	1.6	110.35	169.25	134.58
27	151	45	3.6	1.6	101.29	159.76	144.55
28	145	45	3.6	1.6	92.15	150.35	154.44
29	138	45	3.6	1.6	81.42	139.42	165.89
30	131	45	3.6	1.6	71.08	128.84	176.88
31	125	45	3.6	1.6	62.21	119.76	173.76
32	118	45	3.6	1.6	53.21	110.40	164.06
33	112	45	3.6	1.6	43.55	100.34	153.77
34	104	45	3.6	1.6	32.53	88.80	141.89
35	98	45	3.6	1.6	24.53	80.41	133.19
36	90	45	3.6	1.6	15.17	70.73	123.09

超表面单元, 反射型交叉极化旋转超表面单元没有入射波与重建像的叠加问题, 降低了全波仿真验证和实验验证的复杂性。

3.2 仿真验证

本文使用 CST Studio Suite 软件对该算法的有效性进行了仿真验证。基于交叉极化单元的结构色散关系优化出的超表面全息图相位如图 3(b) 所示, 对生成的全息相位以 10° 为间隔进行离散化处理并转化成设计的超表面单元参数 (外环半径 r 的长度、开口环角度 α 的大小)。本文使用 MATLAB 和 CST 的联合仿真方法生成了超表面全息成像器件。仿真时, 采用水平极化的平面电磁波垂直入射至交叉极化转化超表面上, 反射波为垂直极化波, 成像结果不存在入射波叠加问题。图 5 为消色散宽频超表面全息成像器件在 9 GHz、

9.5 GHz、10 GHz、10.5 GHz、11 GHz 时的仿真结果。

3.3 实验验证

加工后的超表面全息成像器件实物图如图 6(a) 所示, 由 32×32 个单元构成。图 6(b) 为微波测试平台。图中的矢量网络分析仪 (Ceyear 3672C) 频率测试范围为 10 MHz~40 GHz, 端口 1 连接工作频段为 8 GHz~12 GHz 的喇叭天线、端口 2 连接探针天线。探针天线固定在三维扫描平台上, 通过伺服电机调整探针天线位置来测量成像面上的电场分布。超表面全息成像器件与喇叭天线之间相隔 4 m, 以满足平面波垂直入射的要求。

在 9 GHz~11 GHz 的频率范围内, 测得距离超表面全息成像器件前 150 mm 位置处的归一化电场强度

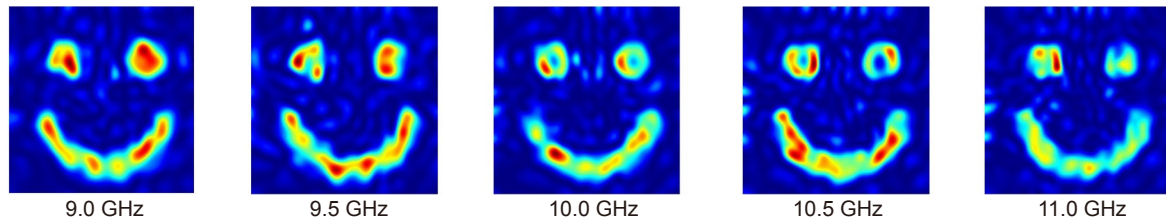


图 5 宽频消色散超表面全息成像器件在 150 mm 处数值模拟仿真的电场强度分布图

Fig. 5 Electric field intensity distributions of broadband dispersion metasurface holographic imaging device at 150 mm

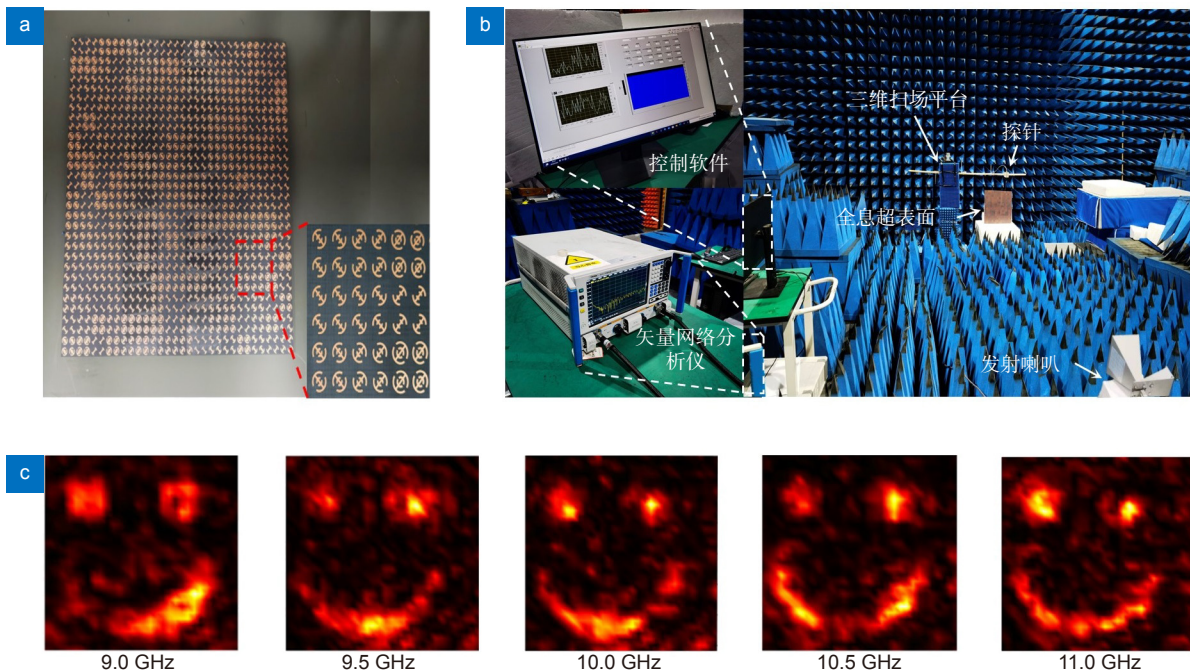


图 6 宽频消色散超表面全息成像器件在 150 mm 处实验测试的电场强度分布图

Fig. 6 Distributions of electric field intensity experimentally measured by a broadband dispersion metasurface holographic imaging device at 150 mm

分布, 如图 6(c) 所示。当测试频点从 9 GHz 升高至 11 GHz 时成像存在一个逐渐清晰的渐变过程, 并且周围存在噪声。实验数据与数值模拟仿真结果之间的差异主要有以下原因: 1) 实验测试时所用的喇叭为标准增益喇叭, 其产生的入射波不是标准的平面波, 入射波到达超表面时的相位不太均一, 导致成像效果不佳; 2) 仿真设置的基板材料与实际加工材料存在差异性, 同时 PCB 加工存在误差。后续可选用性能更好的平面波喇叭提高成像性能。总体而言, 在 9 GHz~11 GHz 的设计带宽范围内, 都可以观察到较为清晰的成像。

4 结 论

本文主要介绍了基于深度学习的消色散宽频超表面全息成像设计, 提出了基于图像去模糊算法的消色散宽频超表面全息图深度学习生成算法。通过软件仿真和实验验证了设计的有效性。实验证明, 所设计的全息成像器件可以在 9 GHz~11 GHz 频段内实现明显的消色差成像。本文算法将深度学习与电磁波领域相结合, 通过深度学习的全局优化能力来得到宽工作频带内有效的超表面全息器件, 解决了全息成像目前面临的频带窄的缺陷, 若将该方法应用于光频段, 有望实现可见光波段的消色散全息成像。在全息成像、宽频功能器件设计等领域具有极大的应用潜力。

参考文献

- [1] Gabor D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, **161**(4098): 777-778.
- [2] Brown B R, Lohmann A W. Complex spatial filtering with binary masks[J]. *Appl Opt*, 1966, **5**(6): 967-969.
- [3] Gabor D. Holography, 1948-1971[J]. *Science*, 1972, **177**(4046): 299-313.
- [4] Jahani S, Jacob Z. All-dielectric metamaterials[J]. *Nat Nanotechnol*, 2016, **11**(1): 23-36.
- [5] Zheng X Y, Smith W, Jackson J, et al. Multiscale metallic metamaterials[J]. *Nat Mater*, 2016, **15**(10): 1100-1106.
- [6] Valentine J, Zhang S, Zentgraf T, et al. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index[J]. *Nature*, 2008, **455**(7211): 376-379.
- [7] Gansel J K, Thiel M, Rill M S, et al. Gold helix photonic metamaterial as broadband circular polarizer[J]. *Science*, 2009, **325**(5947): 1513-1515.
- [8] Ye W M, Zeuner F, Li X, et al. Spin and wavelength multiplexed nonlinear metasurface holography[J]. *Nat Commun*, 2016, **7**: 11930.
- [9] Wang Q, Rogers E T F, Gholipour B, et al. Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials[J]. *Nat Photonics*, 2016, **10**(1): 60-65.
- [10] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission[J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, **10**(11): 937-943.
- [11] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, **334**(6054): 333-337.
- [12] Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci*, 1984, **392**(1802): 45-57.
- [13] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nat Commun*, 2013, **4**: 2808.
- [14] Yue Z J, Xue G L, Liu J, et al. Nanometric holograms based on a topological insulator material[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**: 15354.
- [15] Li L L, Cui T J, Ji W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**(1): 197.
- [16] Malek S C, Ee H S, Agarwal R. Strain multiplexed metasurface holograms on a stretchable substrate[J]. *Nano Lett*, 2017, **17**(6): 3641-3645.
- [17] Chen T H, Li J, Cai T, et al. Design of a reconfigurable broadband greyscale multiplexed metasurface hologram[J]. *Appl Opt*, 2020, **59**(12): 3660-3665.
- [18] Genevet P, Capasso F. Holographic optical metasurfaces: a review of current progress[J]. *Rep Prog Phys*, 2015, **78**(2): 024401.
- [19] Xu K, Wang X E, Fan X H, et al. Meta-holography: from concept to realization[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(10): 220183.
许可, 王星儿, 范旭浩, 等. 超表面全息术: 从概念到实现[J]. *光电工程*, 2022, **49**(10): 220183.
- [20] Yang R, Yu Q Q, Pan Y W, et al. Directional-multiplexing holography by on-chip metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(10): 220177.
杨睿, 于千茜, 潘一苇, 等. 基于片上超表面的多路方向复用全息术[J]. *光电工程*, 2022, **49**(10): 220177.
- [21] Gao H, Fan X H, Xiong W, et al. Recent advances in optical dynamic meta-holography[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(11): 210030.
- [22] Li X, Chen Q M, Zhang X, et al. Time-sequential color code division multiplexing holographic display with metasurface[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, **6**: 220060.
- [23] Li G, Lee D, Jeong Y, et al. Holographic display for see-through augmented reality using mirror-lens holographic optical element[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(11): 2486-2489.
- [24] Zimin V, Hussain F. High-aperture raster holography for particle imaging[J]. *Opt Lett*, 1994, **19**(15): 1158-1160.
- [25] Lempitsky V, Vedaldi A, Ulyanov D. Deep image prior[C]//*Proceedings of 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018: 9446-9454.
<https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00984>.

作者简介



李瑞琛 (1997-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电磁隐身、人工电磁材料与超表面。

E-mail: 22060653@zju.edu.cn



邹毅军 (1997-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电磁隐身、人工电磁材料与超表面。

E-mail: 22031006@zju.edu.cn



【通信作者】陈天航 (1995-), 男, 博士, 工程师, 在基础研究方面主要关注电磁超表面隐身、微波全息、变换光学等方向。

E-mail: greendam@zju.edu.cn



【通信作者】郑斌 (1987-), 男, 博士, 浙江大学信息与电子工程学院副教授, 主要研究方向为新型人工电磁材料与超表面、电磁隐身、新型电磁器件。

E-mail: zhengbin@zju.edu.cn



【通信作者】蔡通 (1990-), 空军工程大学防空反导学院副教授, 主要研究方向为超表面电磁调控、新型天线与智能微波器件设计、电磁隐身。

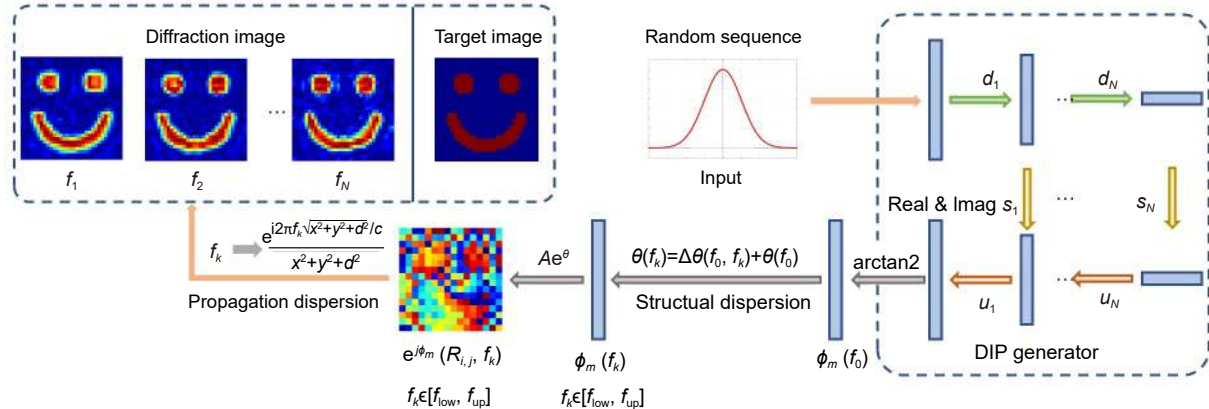
E-mail: caitong@zju.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Broadband achromatic metasurface holography

Li Ruichen^{1†}, Zou Yijun^{1†}, Chen Tianhang^{2*}, Zheng Bin^{1*}, Cai Tong^{3*}



A broadband dispersion metasurface holographic imaging network model based on depth image priors (DIP)

Overview: Computational holography digitizes the whole holographic process by computer, which greatly improves the accuracy and flexibility of imaging. It can realize the display of real or virtual objects without the limitation of the light source, which significantly expands the application field of holography. Metasurface is a two-dimensional planar form of metamaterial, which further increases the degree of freedom by introducing the concept of “macroscopic order” based on the use of structural parameters to control electromagnetic waves, and has the advantages of low material loss and simple processing. Due to its excellent modulation properties, the metasurface is well suitable as a wavefront encoding material for computing holograms, and the combination of metasurface and holographic imaging technology has become one of the current research hotspots in nanotechnology and electromagnetics. However, there are still problems such as low near-field imaging efficiency and narrow frequency band in the metasurface holographic imaging to restrict the practicalization of the metasurface holographic imaging. Aiming at the above problems, a design method of an achromatic broadband metasurface holographic imaging device based on Depth Image Prior (DIP) is proposed in this paper. Firstly, the phase feature vector of the central operating frequency is generated by the convolutional neural networks. Based on the structural dispersion of the actual metasurface elements, the phase feature vector in the working frequency band is also generated. Finally, the frequency band reconstruction image is generated by Rayley-Sommerfeld. The holographic phase map is obtained by the output of the deep convolutional neural network. High-quality reconstructed images can be generated after 20,000 iterations. The reflection cross-polarization unit is used as an example to verify the theoretical algorithm model in this paper. The holographic phase diagram of the network output was discretized at intervals of 10° , and MATLAB and CST co-simulation were used for rapid modeling. Numerical simulation results prove that the designed holographic imaging device can achieve a good achromatic imaging effect in the 9 GHz~11 GHz frequency band. The near-field measured results of bare object and cloak with a wideband frequency signal (8 GHz ~ 12 GHz) via Vector Network Analyzer (VNA) at 9 GHz, 9.5 GHz, 10 GHz, 10.5 GHz, and 11 GHz by plane wave illumination. The difference between experimental results and numerical simulation results is mainly caused by experimental errors and PCB machining errors. In general, relatively clear imaging can be observed in the design bandwidth range of 9 GHz~11 GHz. It has great potential applications in the field of holographic imaging and broadband functional device design.

Li R C, Zou Y J, Chen T H, et al. Broadband achromatic metasurface holography[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 230118; DOI: 10.12086/oe.2023.230118

Foundation item: Project supported by the National Natural Science Foundation of China (62071423)

¹College of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China; ²Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China; ³Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710100, China

* E-mail: greendam@zju.edu.cn; zhengbin@zju.edu.cn; caitong@zju.edu.cn

†These authors contributed equally to this work.