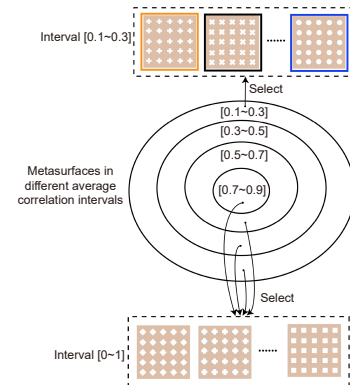


DOI: 10.12086/oe.2022.220130

基于相关性选择的 微型计算光谱探测技术

杨 港^{1,2}, 郭迎辉^{1,2,3}, 蒲明博^{1,2,3},
李 雄^{1,2}, 罗先刚^{1,2*}¹中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室,
四川 成都 610209;²中国科学院大学光电学院, 北京 100049;³中国科学院光电技术研究所矢量光场研究中心, 四川 成都 610209

摘要: 得益于体积小、结构紧凑、易集成等优势, 基于超构表面的微型光谱探测技术近年来被广泛研究。然而, 现有基于超构表面的微型光谱探测系统设计过程中, 通常缺乏对超构表面透射光谱相关性均值与重建质量的定量分析。现有设计过程中采用随机选择方法, 无法保证重建质量最优。本文定量分析了超构表面透射光谱的相关性均值与重建质量的关系, 提出了一种用于微型光谱探测的超构表面设计方法。此外, 本文还验证了基于超构表面的微型光谱探测技术的光谱特性, 相较于随机选择设计方法, 本文所提出方法可提高宽带光谱和图像光谱的重建质量。

关键词: 量化分析; 超构表面; 方法; 微型光谱探测**中图分类号:** O43**文献标志码:** A

杨港, 郭迎辉, 蒲明博, 等. 基于相关性选择的微型计算光谱探测技术 [J]. 光电工程, 2022, 49(10): 220130

Yang G, Guo Y H, Pu M B, et al. Miniature computational spectral detection technology based on correlation value selection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(10): 220130

Miniature computational spectral detection technology based on correlation value selection

Yang Gang^{1,2}, Guo Yinghui^{1,2,3}, Pu Mingbo^{1,2,3}, Li Xiong^{1,2}, Luo Xiangang^{1,2*}¹State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;²School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³Research Center on Vector Optical Fields, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract: Benefiting from the advantages of small size, compact structure, and easy integration, miniature spectral detection technologies based on metasurfaces have been widely studied in recent years. However, the existing designs of the metasurfaces-based miniature spectral detection system usually lack the quantitative analysis of the relationship between the average correlation values of the metasurfaces transmission spectra and the

收稿日期: 2022-06-16; 收到修改稿日期: 2022-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61875253, 61975210); 国家重点研发计划项目 (SQ2021YFA1400121); 中国科学院青年创新促进会资助项目 (2019371)

*通信作者: 罗先刚, lxg@ioe.ac.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

reconstruction quality. The random selection method used in the existing design process cannot guarantee the optimal reconstruction quality. This paper quantitatively analyzes the relationship between the average correlation value of the metasurfaces transmission spectra and reconstruction quality, and proposes a design methodology for miniature spectral detection based on metasurfaces. In addition, this paper also verifies the spectral properties of the metasurfaces-based miniature spectral detection technology. Compared with the random selection design methodology, the proposed methodology can improve the reconstruction fidelity of broadband spectral and image signals.

Keywords: quantitative analysis; metasurfaces; methodology; miniature spectral detection

1 引言

光谱成像探测技术, 是一门通过获取目标的空间信息和光谱信息, 以实现目标探测和识别的技术。因具有精准、非接触检测等多项优点, 光谱成像技术已广泛应用于遥感^[1-3]、医学诊断^[4-5]、食品安全检测^[6]、环境监测^[7]等领域。然而, 传统的光谱成像技术通常存在采样时间长、能量效率低、难以同时获得高光谱和空间分辨率等问题。针对这些问题, 来自杜克大学 Bardy 团队的研究人员提出了一种利用编码孔径及色散结构对空间及光谱信息进行先编码再重建的计算型快照式光谱成像技术^[8-11], 该技术可以在快照模式下同时捕获目标的空间和光谱信息, 并以较少的滤波通道获取更多的光谱波段。然而, 传统的计算型快照式光谱成像系统仍存在结构复杂、体积庞大等问题。

超构表面是一种可对电磁波光谱、振幅和相位进行灵活调控的人工结构功能材料, 因具有结构紧凑、对电磁波灵活调控等多项优点^[12-14], 超构表面已被广泛应用于三维全息^[15-17]、光谱检测^[18-20]、超构透镜^[21-26]、超分辨率成像^[27-29]等领域。为解决传统光谱成像系统存在的结构复杂、难以小型化的问题, 来自清华大学 Cui 团队、威斯康辛大学 Yu 团队及其它团队的研究人员已提出了一些基于超构表面的计算型快照式光谱成像系统^[30-37], 这些系统通常利用超构表面的宽带光谱特性, 并结合压缩感知算法实现轻量化的计算型光谱成像探测。然而, 现有工作中超构表面微纳结构设计, 通常采用先设计大量超构表面再随机进行选择的方法, 这种方法缺乏对超构表面透射谱相关性均值与重建质量的定量分析, 无法保证重建质量最优。

针对上述问题, 来自滨州学院的 Li 等人已提出一种利用极大线性无关准则对传统宽带滤光片进行选择设计的方法^[38-41]。不同于上述方法, 本文定量分析

了超构表面透射光谱相关性均值与重建保真度的关系, 提出了一种用于微型光谱探测的超构表面设计方法。为验证所提出方法的优势, 本文从众多光谱选择了 10 条宽带光谱及图像光谱进行展示。相较于随机选择设计方法, 本文所提出方法能对选定 10 条宽带光谱及图像光谱信号的重建质量进行优化, 宽带光谱重建保真度的增幅可达 13.17%, 图像光谱信号的重建保真度也得到了一定的提升。此外, 本文还仿真验证了基于超构表面的微型光谱探测系统的光谱特性, 该系统对宽带、窄带光谱和图像光谱信号都具有较好的重建效果, 具有结构紧凑、体积小的优势。

2 工作原理

本文对一种用于可见光谱范围 (400 nm~700 nm) 的微型光谱探测系统进行了分析。图 1(a) 描述了该系统的工作原理: 在不同像素点上具备不同光谱信息的图像光谱信号, 经透镜组后被 CMOS 传感器上的多个微型光谱仪所调制, 将调制信号经过压缩感知算法进行恢复处理, 可获得重建图像光谱信号。图像信号中某一特定像素点所携带的光谱信号, 经过置于 CMOS 图像传感器上的单个微型光谱仪被调制, 而重建光谱信号可由调制信号与压缩感知算法重建获得。其中置于 CMOS 图像传感器上的多个微型光谱仪的示意图如图 1(b) 所示, 而单个微型光谱仪由 $M = 36$ 个超构表面组成, 超构表面在特定的结构参数下有着特定的透射光谱, 相应的示意图如图 1(c) 所示。

对于单个像素点上的光谱信号, 当原始光谱入射到具有不同透射光谱的超构表面上时, 第 i 个超构表面下方的光电探测器接收到的调制信号 Y_i 为

$$Y_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_N} f(\lambda) t_i(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda = \mathbf{f}_{1 \times N} \mathbf{T}_{N \times 1}, \quad (1)$$

其中: $f(\lambda)$ 为原始入射光谱, $t_i(\lambda)$ 为第 i 个超构表面的透射光谱, $\eta(\lambda)$ 为光电探测器的响应光谱,

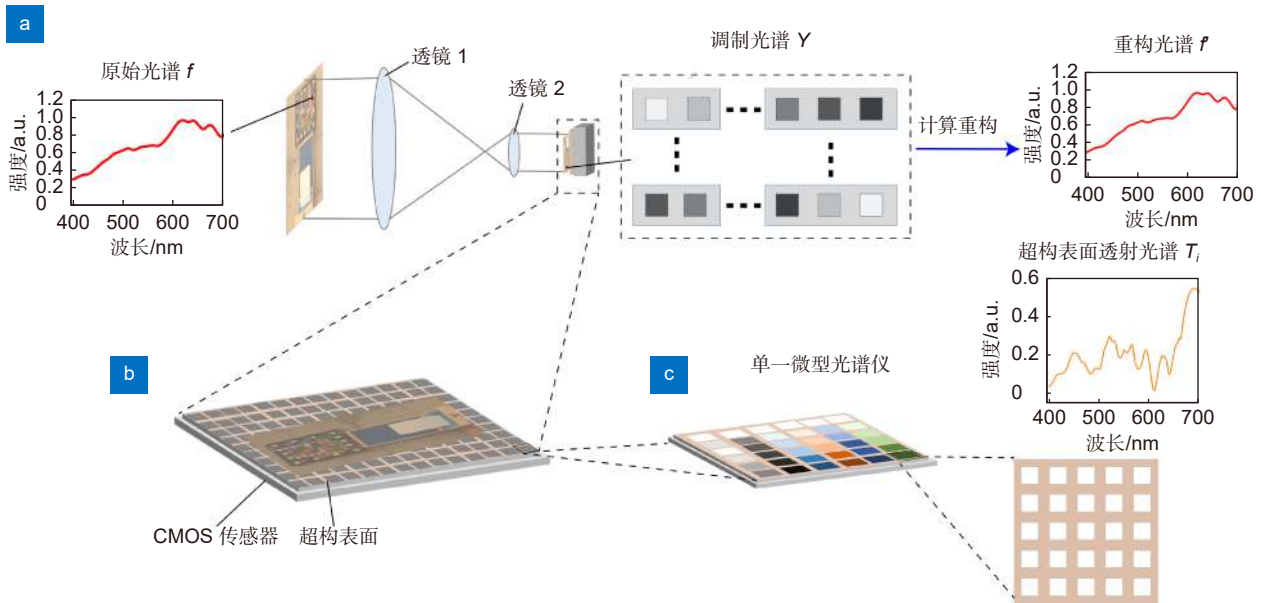


图 1 微型光谱探测。(a) 原理示意图; (b) 多个微型光谱仪的示意图; (c) 单个微型光谱仪及超构表面透射光谱的示意图
 Fig. 1 Miniature spectral detection. (a) Schematic diagram of the working principle; (b) Schematic diagram of numerous micro-spectrometers; (c) Schematic diagram of a single micro-spectrometer and transmission spectrum of a metasurface

$\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$ 为波长采样点。为简化公式, 将光电探测器的响应光谱与超构表面的透射光谱进行整合, $T_i(\lambda) = t_i(\lambda)\eta(\lambda)$, 最终式 (1) 变换为 $Y_i(\lambda) = f(\lambda)T_i(\lambda)$ 。当超构表面的结构数量为 M 时, M 个超构表面下的光电探测器可以一次性接收到 M 个不同的信号 Y_M , 相应地式 (1) 变换为 $Y_{1 \times M} = f_{1 \times N} T_{N \times M}$, 而原始光谱 $f(\lambda)$ 可以通过求解上述方程来重建。

原始光谱信号 $f(\lambda)$ 需具备稀疏性才能被高光谱探测压缩感知采集, 而自然界中的大多数光谱 $f(\lambda)$ 并不具备稀疏性, 因此, 需要将光谱信号映射到其他稀疏域以获得稀疏表示, 使得 $f = P_{si} \times x$, 其中 P_{si} 为稀疏变换矩阵, x 为稀疏向量, 则式 (1) 可转化为 $Y = T \times f = T \times P_{si} \times x$ ^[42]。重建过程的原理可以用以下公式进行表示^[43-45]:

$$\begin{aligned} & \min \|x\|_1 \\ & \text{s.t. } \|T \times P_{si} \times x - Y\|_2 \leq \delta, \end{aligned} \quad (2)$$

其中: 范数 l_1 定义为 $\|x\|_1 = \sum_{j=1}^n |x(\lambda_j)|$, 残差 δ 为极小的正常数。当残差接近 0 时, 可以通过预先得到稀疏解 x , 求解得到重建光谱 $f(\lambda)$ 。作为压缩感知算法的其中一类, 本文采用了基于贪婪算法的正交匹配追踪算法进行光谱重构, 该算法能在每次迭代中, 保证残差与已选传感矩阵的基正交, 减少算法的迭代次数, 从而保证较高的实时性。该算法对单一光谱的重建计算耗时约为 2 s。

3 超构表面的数值仿真

在压缩感知算法中, 由超构表面透射光谱和光电探测器响应光谱组成的 $T_i(\lambda)$ 被称为测量矩阵, 而测量矩阵是实现光谱压缩、重建还原的重要工具, 因此超构表面的合理设计至关重要。本文采用有限时域差分法 (FDTD) 仿真了具有不同内孔图案及结构参数的超构表面, 超构表面的单元结构从上到下由 190 nm 厚的晶体硅膜和蓝宝石衬底组成, 190 nm 厚的晶体硅膜具有不同周期 p 和内孔图案, 单元结构示意图如图 2(a) 所示。为满足超构表面在光谱重建中丰富透射光谱的需求, 本文将结构周期 p 、内孔图案、孔结构参数 l 、 w 、 d 和旋向角 θ 作为其自由度, 超构表面的外部周期 (p) 的变化范围为 350 nm~750 nm, 内部周期 (l 、 w 、 d) 的变化范围为 150 nm~550 nm, 占空比 (l/p 、 w/p 、 d/p) 的变化范围为 15%~65%, 旋向角 θ 为 0° 或 45°, 根据以上结构参数的变换范围, 本文仿真出约 4200 组的超构表面。

不同超构表面具有不同的内孔图案和结构参数, 用橙色方框标注的超构表面的内孔图案与结构参数为十字形, $p = 450$ nm, $l = 330$ nm, $w = 140$ nm, $\theta = 0^\circ$; 用黑色方框标注的超构表面的内孔图案与结构参数为十字形, $p = 550$ nm, $l = 395$ nm, $w = 215$ nm, $\theta = 45^\circ$; 用蓝色方框标注的超构表面的内孔图案与结构

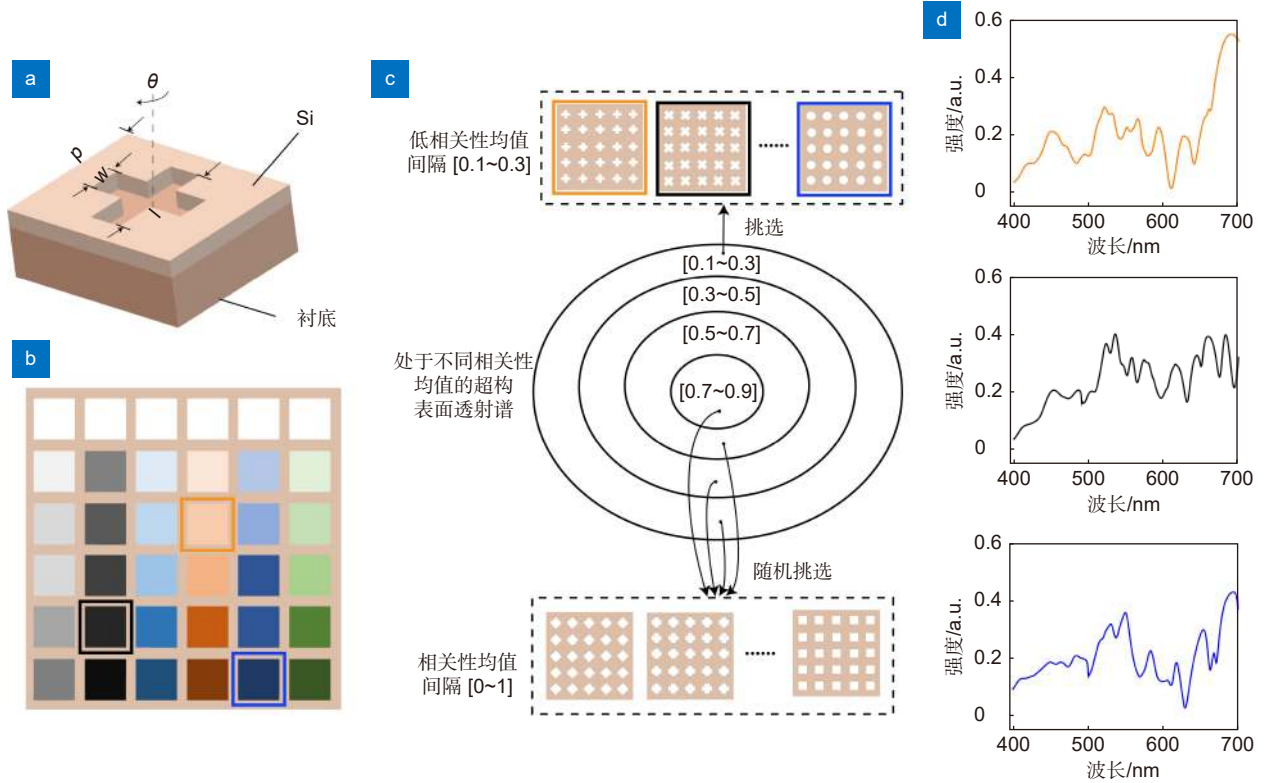


图 2 超构表面的设计。(a) 超构表面的单元结构；(b) 单个微型光谱仪的示意图；(c) 根据不同相关性均值间隔对超构表面进行选择的设计示意图；(d) 不同图样的超构表面透射光谱

Fig. 2 Design of the metasurfaces. (a) The unit cell of the metasurfaces; (b) Schematic diagram of a single micro-spectrometer; (c) Schematic diagram of the selection of metasurfaces according to different average correlation value intervals; (d) Transmission spectra of different patterns of the metasurfaces

参数为圆形, $p = 560 \text{ nm}$, $d = 195 \text{ nm}$, 如图 2(b) 及图 2(c) 顶部所示。图 2(c) 为依据不同相关性均值对超构表面进行选择设计的示意图, 图片顶部为依据相关性均值间隔 [0.1~0.3] 进行选择, 图片底部为依据相关性均值间隔 [0~1] 进行选择。其中第 i 、 j 个超构表面透射光谱的相关性均值被定义为

$$(t_i, t_j) = \frac{\text{cov}(t_i, t_j)}{\sigma_{t_i} \sigma_{t_j}} = \frac{(t_i - \bar{t}_i)(t_j - \bar{t}_j)}{\sigma_{t_i} \sigma_{t_j}}, \quad (3)$$

其中: t_i, t_j 分别为第 i 个和第 j 个超构表面的透射光谱, $\text{cov}(t_i, t_j)$ 为透射光谱 t_i, t_j 的协方差, \bar{t}_i, \bar{t}_j 为光谱 t_i, t_j 的均值, $\sigma_{t_i}, \sigma_{t_j}$ 为光谱 t_i, t_j 的标准差。当 $i = j$ 时, 相关性值 $\rho(t_i, t_j) = 1$, 将此类相关性值去掉后, $M = 36$ 个超构表面中第 i 列的相关性均值被定义为

$$\rho_{\text{column}}(i) = \frac{\sum_{j=1}^M |\rho(t_i, t_j)|}{M-1} \quad (i \neq j). \quad (4)$$

$M=36$ 个超构表面的总相关性均值被定义为

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^M |\rho_{\text{column}}(i)|}{M}. \quad (5)$$

同时, 为量化分析重建光谱与原始光谱的吻合程度, 本文采用重建保真度 F 来定义, 其公式为

$$F(f_1(i), f_2(i)) = \left(1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_1(i) - f_2(i))^2}{\sum_{i=1}^n f_1(i)^2}} \right) \times 100\%, \quad (6)$$

其中: f_1 为原始光谱, f_2 为重建光谱。不同内孔图案和结构参数的超构表面具备不同的透射光谱, 满足了超构表面丰富透射光谱的设计需求, 在图 2(b) 中用不同颜色方框标注的结构所对应的透射光谱如图 2(d) 所示。

4 相关性均值与重建保真度分析

测量矩阵 $T_i(\lambda)$ 由超构表面透射光谱导入, 因此对超构表面的设计方法, 本质是一种对测量矩阵构建优化的方法。为完成对测量矩阵的构建优化, 本文定量分析了超构表面透射光谱相关性均值与重建保真度的关系, 并提出一种用于微型光谱探测的超构表面设计方法。该方法的流程图如图 3 左侧所示, 该方法包含以下几个步骤: 首先, 给出一条具有特定带宽和中心

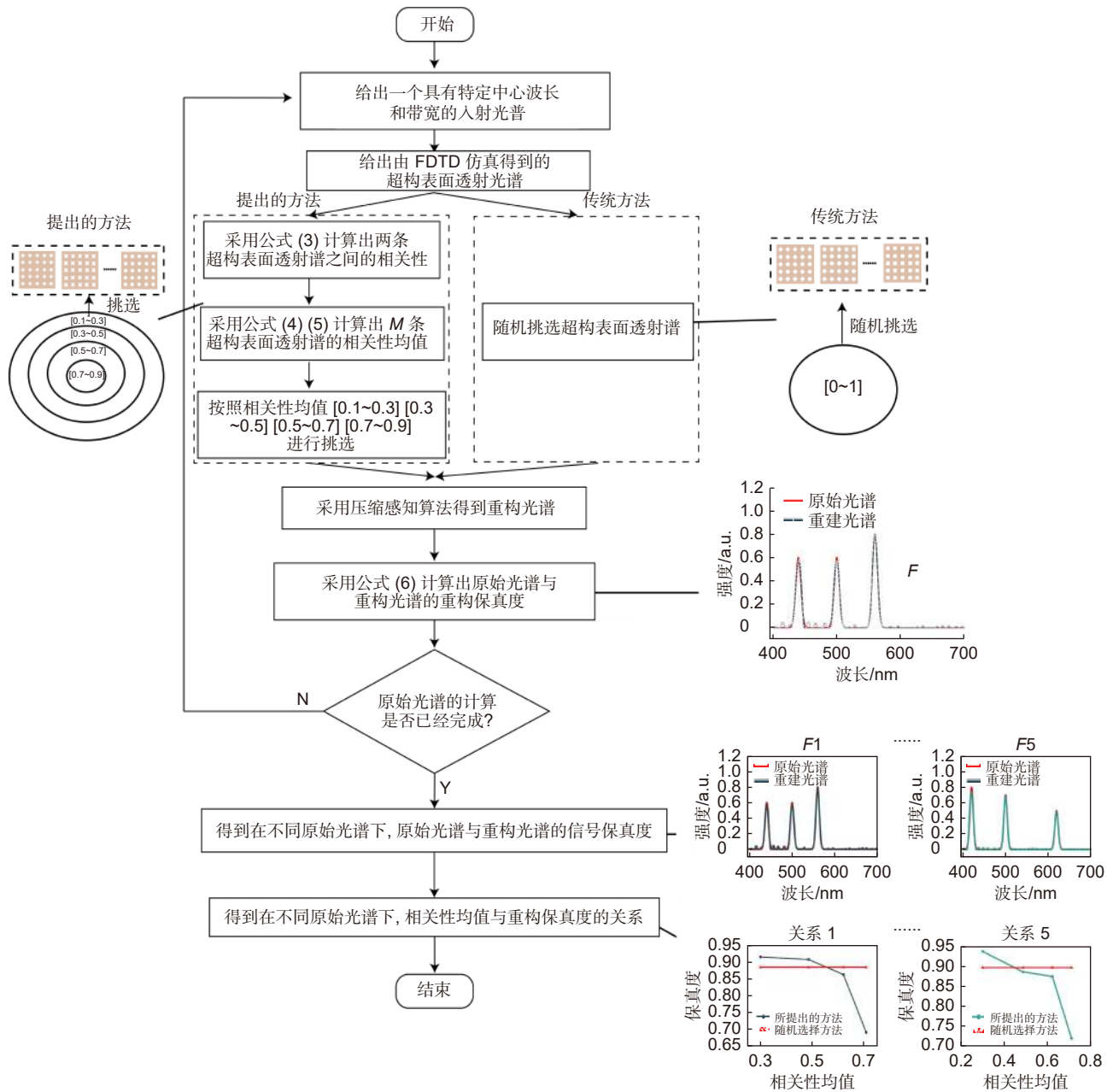


图 3 本文所提出方法与传统方法的流程图

Fig. 3 Flow chart of our proposed methodology and traditional methodology

波长的原始入射光谱; 随后, 给出多组超构表面结构透射光谱; 接下来, 在本文所提出的方法中, 采用式 (3) 得到两种超构表面透射光谱的相关性值, 并采用式 (4), 式 (5) 得到 M ($M=36, 49$ 或 64) 组超构表面的相关性均值; 然后, 依据不同相关性均值间隔 $[0.1\sim 0.3]$ 、 $[0.3\sim 0.5]$ 、 $[0.5\sim 0.7]$ 和 $[0.7\sim 0.9]$ 选择出 M 组超构表面的透射光谱; 接下来, 采用压缩感知算法重建原始入射光谱,

并通过式 (6) 计算原始光谱与重建光谱之间的重

建保真度 F ; 最后, 当所有原始入射光谱计算完成后, 可以得到不同原始入射光谱下的重建保真度 F , 以及超构表面透射谱相关性均值与重建保真度 F 的量化关系。相比之下, 传统结构设计方法通常采用随机方式进行选择, 图 3 右侧为传统方法的流程图。本文完成了超构表面透射谱相关性均值所有范围 $0\sim 1$ 的计算, 但计算所得的相关性均值处于 $0.1\sim 0.9$ 区间内, 没有处于相关性均值 $0\sim 0.1$ 的区间, 为保证计算及分析的准确性, 本文舍弃了 $0\sim 0.1$ 这段。

本文从众多光谱选择了 10 条宽带光谱用于验证所提出方法的优势, 采用上述两种选择设计方法对 10 条选定的原始入射光谱进行重建, 可得到如表 1 所示的重建保真度数据。如表 1 数据所示, 相关性均值间隔 [0.1~0.3] 内的超构表面所产生的光谱重建保真度均高于随机选择的超构表面所产生的光谱重建保真度, 对于 10 条选定的原始光谱, 光谱重建保真度的增幅可达 13.17%, 对于其他未知原始光谱, 本文所提出方法可能存在更高的重建保真度增幅。这些结果表明, 相较于传统随机选择方法, 本文所提出方法能在一定程度上优化光谱重建质量。此外, 相关性均值间隔 [0.1~0.3] 的超构表面所得到的光谱重建保真度, 通常优于相关性均值间隔 [0.3~0.5]、[0.5~0.7]、[0.7~0.9] 的超构表面所得到的重建保真度。因此在微型光谱探测技术中, 低相关性均值的超构表面结构能带来更高的光谱重建保真度。

图 4 展示了表 1 中不同超构表面选择设计方法所产生的重建保真度。图 4(a) 和 4(b) 为汇总了表 1 中的原始入射光谱 1~5 及光谱 6~10 的示意图。图 4(c) 和 4(d) 重点描述了在入射光谱 5、光谱 10 下, 不同超构表面选择设计方法产生的重建保真度。如图 4(c) 和 4(d) 所示, 相较于传统随机选择方法, 选择相关性均值间隔 [0.1~0.3] 内的超构表面所产生的重建保真度均有不同程度的增幅, 这表明本文所提出方法能在一定程度上提高压缩感知算法的光谱重建保真度。

如表 1 数据与图 4 的原始入射光谱所示, 不同的原始入射光谱有着不同的光谱重建保真度及增幅, 经分析后发现, 当原始光谱在较短波长范围内 (400

nm~450 nm) 有光谱分量时, 保真度增幅较低, 如光谱 1、2、9; 当原始光谱在较短波长范围内不包含有光谱分量时, 保真度增幅较高, 如光谱 4、5、8、10。以上结果表明, 本方法保真度提升量和原始光谱相关, 该方法最适用于在较短波长无光谱分量的原始光谱。

5 光谱特性的仿真验证

为获得微型光谱探测系统的完整性能指标, 本文对系统的光谱特性进行了仿真验证。仿真验证的流程为: 首先, 采用有限时域差分 (FDTD, finite difference time domain) 软件仿真出具有不同结构参数与内孔图案的超构表面透射光谱, 将仿真所得的多条超构表面透射光谱导出, 用作压缩感知算法的测量矩阵 T ; 随后, 采用不同中心波长与带宽的光谱作为原始入射光谱 f_1 , 将原始入射光谱 f_1 与测量矩阵相乘后得到调制光谱 Y ; 随后, 编写好压缩感知重建算法, 通过所得的调制光谱 Y 与测量矩阵 T , 重建出与原始光谱 f_1 相近的重建光谱 f_2 ; 最后, 采用保真度式 (6) 计算出原始光谱与重建光谱的保真度 F 。

首先, 采用窄带光谱验证系统感知自然界中单色光的能力, 将原始入射光谱设为中心波长为 560 nm、带宽为 1.8 nm 的窄带光谱, 图 5(a) 为窄带光谱下的重建效果, 图 5(b) 是图 5(a) 的中心波长附近的放大图像。如图 5(a) 和 5(b) 所示, 重建后的光谱与原始光谱吻合, 系统能准确感知窄带光谱。随后, 本文仿真验证了系统的光谱分辨率, 将原始入射光谱设为中心波长间隔分别为 2 nm 和 3 nm、带宽为 1.8 nm 的双峰光谱, 图 5(c) 和 5(d) 为双峰光谱下的重建结果。如

表 1 不同超构表面选择设计方法所产生的重建保真度

Table 1 The reconstruction fidelity produced by different metasurfaces selection design methodologies

光谱	本文提出方法所产生(处于不同相关性均值间隔)的信号重建保真度				传统随机选择方法所产生的信号重建保真度/%	本文方法所产生的信号重建保真度增幅/%
	[0.1~0.3]/%	[0.3~0.5]/%	[0.5~0.7]/%	[0.7~0.9]/%		
光谱1	92.36	91.58	86.99	69.18	89.20	3.50
光谱2	93.83	88.70	87.55	71.95	89.77	4.52
光谱3	97.62	53.01	48.64	50.33	90.84	7.46
光谱4	98.52	77.91	75.09	71.65	90.20	9.22
光谱5	97.07	82.74	79.10	60.06	87.17	11.36
光谱6	96.41	92.29	90.05	85.01	89.32	7.94
光谱7	96.58	94.40	94.48	85.60	91.83	5.17
光谱8	95.75	89.02	90.34	63.26	87.13	9.89
光谱9	98.64	88.05	91.05	83.88	93.96	3.98
光谱10	97.54	94.10	82.70	42.34	86.65	13.17

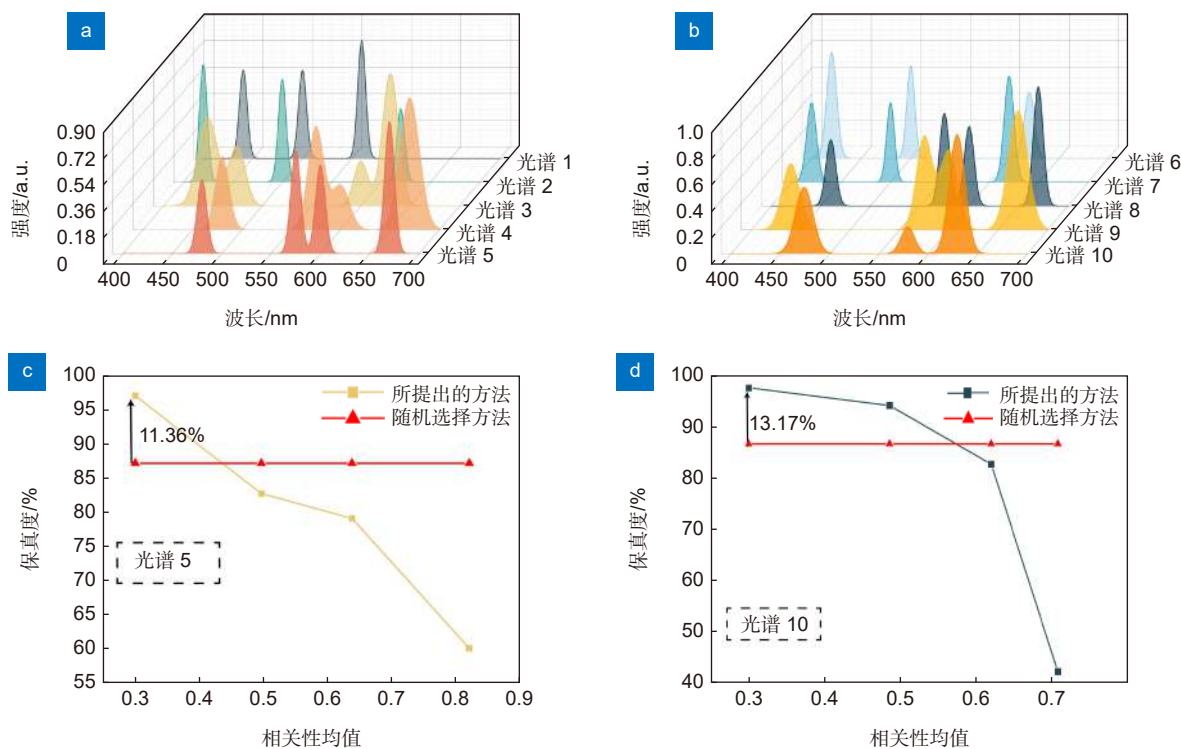


图 4 表 1 中不同超构表面选择设计方法所产生的重建保真度。(a) 表 1 中的光谱 1~5; (b) 表 1 中的光谱 6~10; (c) 在光谱 5 下, 采用不同的超构表面设计方法所产生的重建保真度; (d) 在光谱 10 下, 采用不同的超构表面设计方法所产生的重建保真度

Fig. 4 The reconstruction fidelity produced by different metasurfaces selection design methodologies in Table 1. (a) Spectrum 1~5 in Table 1; (b) Spectrum 6~10 in Table 1; (c) The reconstruction fidelity produced by different metasurfaces selection design methodologies under spectrum5; (d) The reconstruction fidelity produced by different metasurfaces selection design methodologies under spectrum10

图 5(c) 和 5(d) 所示, 系统能较好地分辨中心波长间隔为 3 nm 的双峰光谱, 不能分辨中心波长间隔为 2 nm 的双峰光谱, 这表明系统的光谱分辨率约为 3 nm。随后, 本文验证了系统感知宽带光谱的能力, 将入射光谱设定为不同中心波长和带宽的宽带光谱, 图 5(e) 和 5(f) 为宽带光谱下的重建结果。如图 5(e) 和 5(f) 所示, 系统对宽带光谱具有较好的重建效果, 这表明系统能对宽带光谱进行感知重建。为测试不同数量的超构表面对重建保真度的影响, 图 5(e) 和 5(f) 还分别描述了超构表面数量 M 为 36、49 和 64 时宽带光谱的重建效果。如图 5(e) 和 5(f) 所示, 随着结构数量增加, 重建光谱的保真度也相应增加, 这是因为随着超构表面的数量增加, 其透射光谱的随机性也增加, 重建算法对噪声的鲁棒性也相应增强。

最后, 本文将维度为 $1392 \times 1083 \times 601$ 的图像光谱信号设定为原始光谱, 其中 1392×1083 为图像纵横比, 601 为波长采样点的个数, 该图像光谱信号数据来源于跨学科计算视觉实验室^[46], 原始图像光谱信号如

图 6(a) 所示。采用图 3 的方法, 在现有的超构表面透射光谱数据库中, 依据所提出的方法和随机选择设计方法, 分别选择出了两组不同的超构表面。原始图像光谱信号通过两组不同的超构表面后被调制, 被调制的信号经压缩感知算法恢复后可得到两组重建的图像光谱信号, 其中按照相关性均值 [0.1~0.3] 选择出的超构表面结构所产生的重建图像光谱信号如图 6(b) 所示。为表征系统感知图像光谱信号的能力, 本文展示了四个色块的重建结果, 结果示意图如图 6(c) 所示, 其中重建光谱 1 为依据相关性均值 [0.1~0.3] 选择的超构表面所产生的, 重建光谱 2 为随机选择出的超构表面所产生的。如图 6(c) 所示, 在所选择的四个色块, 重建光谱 1 的保真度始终高于重建光谱 2 的保真度, 这表明相较于随机选择设计方法, 本文所提出的超构表面设计方法, 能在一定程度上提高图像光谱信号的重建质量。

如表 1 与图 6 的保真度数据所示, 表 1 中的保真度增幅高于图 6 图像光谱的保真度增幅, 经分析后发

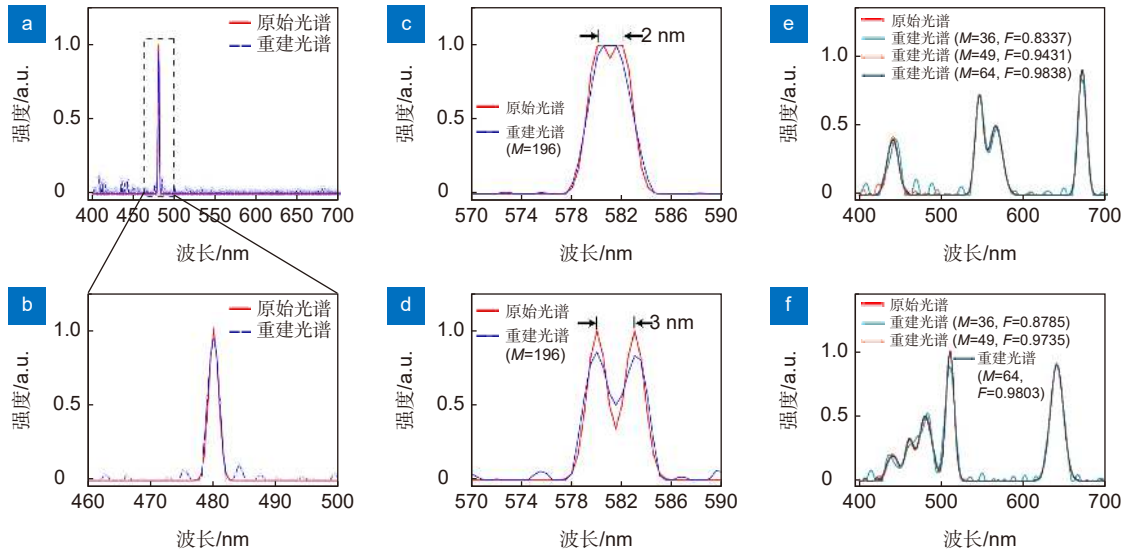


图 5 光谱特性仿真验证。(a) 中心波长为 560 nm, 带宽为 1.8 nm 的入射光谱和重建光谱; (b) 图 5(a) 中心波长处的放大图像; (c) 中心波长间隔为 2 nm 的光谱分辨率仿真验证; (d) 中心波长间隔为 3 nm 的光谱分辨率仿真验证; (e) 不同结构数量 M 下, 宽带光谱 1 的重建光谱及重建保真度; (f) 不同结构数量 M 下, 宽带光谱 2 的重建光谱及重建保真度

Fig. 5 Spectral characteristic simulation verification. (a) Incident spectrum and the reconstructed spectrum with a central wavelength of 560 nm and a bandwidth of 1.8 nm; (b) Enlarged images around the central wavelength in Fig. 5(a); (c) Spectral resolution simulation verification with a central wavelength interval of 2 nm; (d) Spectral resolution simulation verification with a central wavelength interval of 3 nm; (e) Reconstruction spectrum and reconstruction fidelity of broadband spectrum 1 under different number of structures M ; (f) Reconstruction spectrum and reconstruction fidelity of broadband spectrum 2 under different number of structures M

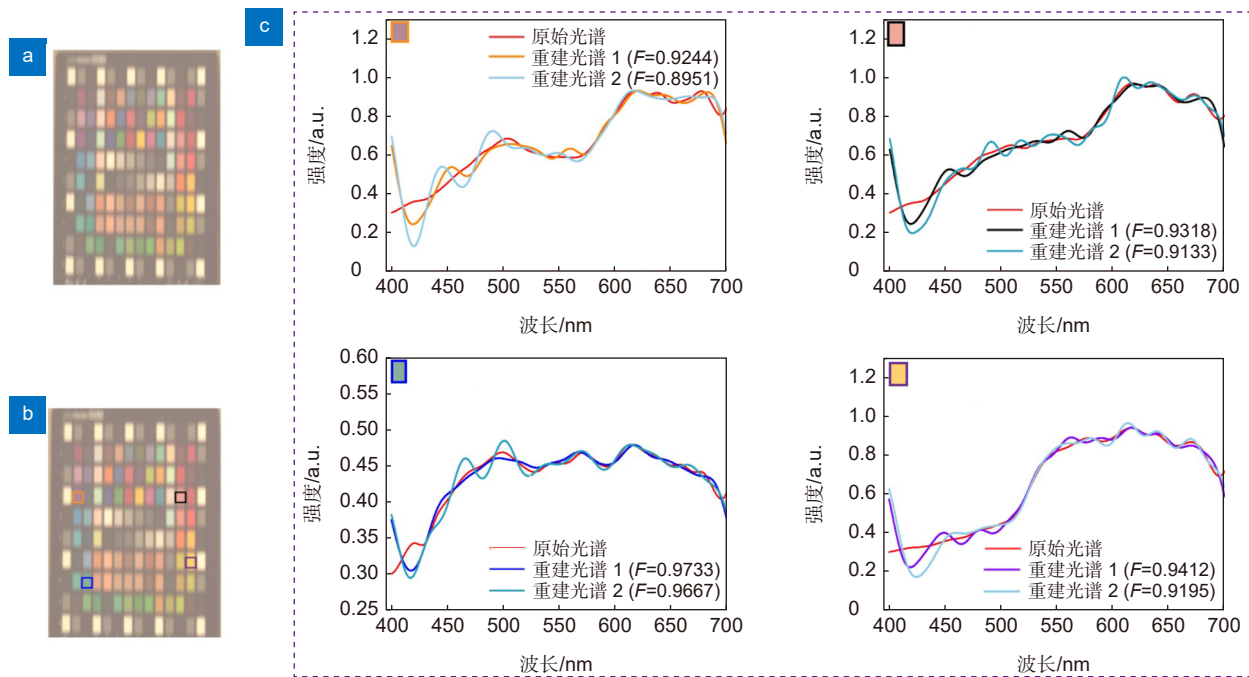


图 6 图像光谱信号感知验证。(a) 原始的图像光谱信号^[46]; (b) 重建的图像光谱信号; (c) 在不同色块下, 两种超构表面设计方法所产生的光谱信号重建保真度。其中重建光谱 1 由按照相关性均值 [0.1~0.3] 所选择出的超构表面结构所产生, 重建光谱 2 由按随机选择出的超构表面结构所产生

Fig. 6 Image spectral signals perception verification. (a), (b) Original and reconstructed image spectral signals respectively^[46]; (c) Reconstruction fidelity of spectral signals generated by different metasurface design methods under different color blocks. The reconstructed spectrum 1 is produced from the metasurface structures selected using the average correlation value interval [0.1~0.3], and the reconstructed spectrum 2 is produced from the randomly selected metasurface structures

现, 图像光谱的重建光谱在 400 nm~500 nm 范围内有较大杂散波, 而与图 5(e)~5(f) 类似的表 1 的宽带重建光谱在此波长范围内并无太大杂散波, 这表明微型光谱探测系统对表 1 宽带光谱的兼容性优于对图 6 图像光谱的兼容性, 兼容性的差异导致了表 1 中的保真度增幅高于图 6 图像光谱的保真度增幅。

6 结 论

本文完成了超构表面透射光谱的仿真设计, 并对一种基于超构表面的微型光谱探测系统进行了分析。针对现有基于超构表面的微型光谱探测系统设计中存在的超构表面设计缺少定量分析、无法保证重建质量最优的问题, 本文定义了超构表面透射光谱的相关性均值, 定量分析了超构表面透射光谱相关性均值与重建保真度的关系, 提出一种用于微型光谱探测的超构表面设计方法。为验证所提出方法的优势, 本文从众多光谱选择了 10 条宽带光谱及图像光谱进行展示。相较于随机选择设计方法, 本文所提出方法能提高选定的 10 条宽带光谱与图像光谱信号的重建质量, 宽带光谱重建保真度的增幅可达 13.17%, 图像光谱信号的重建保真度也得到一定的提升。此外, 本文还仿真验证了基于超构表面的微型光谱探测系统的光谱特性, 该系统对宽带、窄带光谱和图像光谱信号都具有较好的重建效果, 具有结构紧凑、体积小的优势。

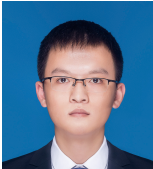
参考文献

- [1] Shaw G A, Burke H H K. Spectral imaging for remote sensing[J]. *Lincoln Lab J*, 2003, 14(1): 3-28.
- [2] Greaves J S, Richards A M S, Bains W, et al. Phosphine gas in the cloud decks of Venus[J]. *Nat Astron*, 2021, 5(7): 655-664.
- [3] Bahaudin S M, Bradshaw S J, Winebarger A R. The origin of reconnection-mediated transient brightenings in the solar transition region[J]. *Nat Astron*, 2021, 5(3): 237-245.
- [4] Vilaseca M, Mercadal R, Pujol J, et al. Characterization of the human iris spectral reflectance with a multispectral imaging system[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(30): 5622-5630.
- [5] Panasyuk S V, Yang S, Fallor D V, et al. Medical hyperspectral imaging to facilitate residual tumor identification during surgery[J]. *Cancer Biol Ther*, 2007, 6(3): 439-446.
- [6] Askoura M L, Vaudelle F, L'Huillier J P. Multispectral measurement of scattering-angular light distribution in apple skin and flesh samples[J]. *Appl Opt*, 2016, 55(32): 9217-9225.
- [7] Davis C O. Applications of hyperspectral imaging in the coastal ocean[J]. *Proc SPIE*, 2002, 4816: 33-41.
- [8] Cao X, Yue T, Lin X, et al. Computational snapshot multispectral cameras: toward dynamic capture of the spectral world[J]. *IEEE Signal Proc Mag*, 2016, 33(5): 95-108.
- [9] Wagadarikar A, John R, Willett R, et al. Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging[J]. *Appl Opt*, 2008,

- 47(10): B44-B51.
- [10] Gehm M E, John R, Brady D J, et al. Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture[J]. *Opt Express*, 2007, 15(21): 14013-14027.
- [11] Wagadarikar A A, Pitsianis N P, Sun X B, et al. Spectral image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers[J]. *Proc SPIE*, 2008, 7076: 707602.
- [12] Ma X L, Pu M B, Li X, et al. All-metallic wide-angle metasurfaces for multifunctional polarization manipulation[J]. *Opto-Electron Adv*, 2019, 2(3): 180023.
- [13] Zhang Y B, Liu H, Cheng H, et al. Multidimensional manipulation of wave fields based on artificial microstructures[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, 3(11): 200002.
- [14] Yue Z, Li J T, Li J, et al. Terahertz metasurface zone plates with arbitrary polarizations to a fixed polarization conversion[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, 1(3): 210014.
- [15] Gao H, Fan X H, Xiong W, et al. Recent advances in optical dynamic meta-holography[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(11): 210030.
- [16] Larouche S, Tsai Y J, Tyler T, et al. Infrared metamaterial phase holograms[J]. *Nat Mater*, 2012, 11(5): 450-454.
- [17] Zhang F, Pu M B, Gao P, et al. Simultaneous full-color printing and holography enabled by centimeter-scale plasmonic metasurfaces[J]. *Adv Sci*, 2020, 7(10): 1903156.
- [18] Faraji-Dana M S, Arbabi E, Arbabi A, et al. Compact folded metasurface spectrometer[J]. *Nat Commun*, 2018, 9(1): 4196.
- [19] Horie Y, Arbabi A, Arbabi E, et al. Wide bandwidth and high resolution planar filter array based on DBR-metasurface-DBR structures[J]. *Opt Express*, 2016, 24(11): 11677-11682.
- [20] Redding B, Liew S F, Sarma R, et al. Compact spectrometer based on a disordered photonic chip[J]. *Nat Photonics*, 2013, 7(9): 746-751.
- [21] Dou K H, Xie X, Pu M B, et al. Off-axis multi-wavelength dispersion controlling metalens for multi-color imaging[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, 3(4): 190005.
- [22] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [23] Wang Y L, Fan Q B, Xu T. Design of high efficiency achromatic metalens with large operation bandwidth using bilayer architecture[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(1): 200008.
- [24] Wang H T, Hao C L, Lin H, et al. Generation of super-resolved optical needle and multifocal array using graphene oxide metalenses[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(2): 200031.
- [25] Zhou Y, Liang G F, Wen Z Q, et al. Recent research progress in optical super-resolution planar meta-lenses[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(12): 210399.
周毅, 梁高峰, 温中泉, 等. 光学超分辨平面超构透镜研究进展[J]. *光电工程*, 2021, 48(12): 210399.
- [26] Shen Y J, Xie X, Pu M B, et al. Achromatic metalens based on coordinative modulation of propagation phase and geometric phase[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(10): 200237.
申益佳, 谢鑫, 蒲明博, 等. 基于传输相位和几何相位协同调控的消色差超透镜[J]. *光电工程*, 2020, 47(10): 200237.
- [27] Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.
- [28] Luo X G, Ishihara T. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(23): 4780-4782.

- [29] Butt H, Montelongo Y, Butler T, et al. Carbon nanotube based high resolution holograms[J]. *Adv Mater*, 2012, **24**(44): OP331–OP336.
- [30] Wang Z, Yi S, Chen A, et al. Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**(1): 1020.
- [31] Xiong J, Cai X S, Cui K Y, et al. Dynamic brain spectrum acquired by a real-time ultraspectral imaging chip with reconfigurable metasurfaces[J]. *Optica*, 2022, **9**(5): 461–468.
- [32] Bao J, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer[J]. *Nature*, 2015, **523**(7558): 67–70.
- [33] Zhu Y B, Lei X, Wang K X, et al. Compact CMOS spectral sensor for the visible spectrum[J]. *Photonics Res*, 2019, **7**(9): 961–966.
- [34] Zhang W Y, Song H Y, He X, et al. Deeply learned broadband encoding stochastic hyperspectral imaging[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 108.
- [35] Yang Z Y, Albrow-Owen T, Cui H X, et al. Single-nanowire spectrometers[J]. *Science*, 2019, **365**(6457): 1017–1020.
- [36] Meng J J, Cadusch J J, Crozier K B. Detector-only spectrometer based on structurally colored silicon nanowires and a reconstruction algorithm[J]. *Nano Lett*, 2020, **20**(1): 320–328.
- [37] Kwak Y, Park S M, Ku Z, et al. A pearl spectrometer[J]. *Nano Lett*, 2021, **21**(2): 921–930.
- [38] Li S X. Broadband filter selection for multispectral camera based on multi-objective optimization[J]. *Acta Opt Sin*, 2020, **40**(4): 0411001.
李遂贤. 基于多目标优化的多光谱相机的宽带滤色片选取[J]. *光学报*, 2020, **40**(4): 0411001.
- [39] Li S X. Filter selection for optimizing the spectral sensitivity of broadband multispectral cameras based on maximum linear independence[J]. *Sensors*, 2018, **18**(5): 1455.
- [40] Li S X, Zhang L Y. Optimal sensitivity design of multispectral camera via broadband absorption filters based on compressed sensing[C]//*3rd International Symposium of Space Optical Instruments and Applications*, 2017: 329–339. doi: 10.1007/978-3-319-49184-4_33.
- [41] Li S X. Superiority of optimal broadband filter sets under lower noise levels in multispectral color imaging[J]. *Color Res Appl*, 2021, **46**(4): 783–790.
- [42] Zhang S, Dong Y H, Fu H Y, et al. A spectral reconstruction algorithm of miniature spectrometer based on sparse optimization and dictionary learning[J]. *Sensors*, 2018, **18**(2): 644.
- [43] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 2006, **52**(4): 1289–1306.
- [44] Baraniuk R. Compressive sensing[C]//*42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems*, 2008. doi: 10.1109/CISS.2008.4558479.
- [45] Figueiredo M A T, Nowak R D, Wright S J. Gradient projection for sparse reconstruction: application to compressed sensing and other inverse problems[J]. *IEEE J Sel Top Signal Proc*, 2007, **1**(4): 586–597.
- [46] Arad B, Ben-Shahar O. Sparse recovery of hyperspectral signal from natural RGB images[C]//*Proceedings of the 14th European Conference on Computer Vision*, 2016: 19–34. doi: 10.1007/978-3-319-46478-7_2.

作者简介



杨港 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事微纳光学方面的研究。

E-mail: yanggang19@mails.ucas.ac.cn

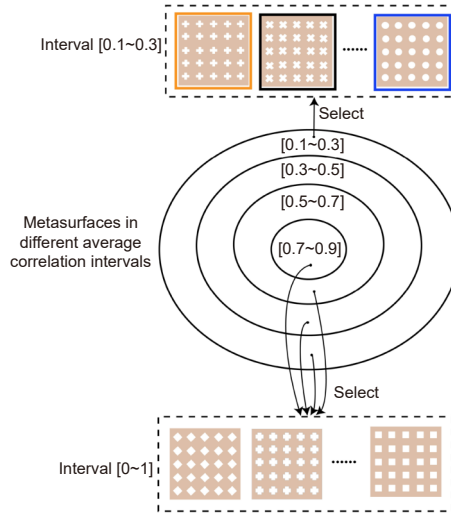


【通信作者】罗先刚 (1970-), 男, 博士, 研究员, 中国工程院院士, 中国光学学会会士, 美国光学学会 (Optica) 会士, 国际光学工程学会 (SPIE) 会士, 主要研究方向包括微纳光学、表面等离子体光子学、亚波长电磁学和悬链线光学。

E-mail: lxxg@ioe.ac.cn

Miniature computational spectral detection technology based on correlation value selection

Yang Gang^{1,2}, Guo Yinghui^{1,2,3}, Pu Mingbo^{1,2,3}, Li Xiong^{1,2}, Luo Xiangang^{1,2*}



Schematic diagram of different metasurface selection methodologies

Overview: Spectral imaging detection technology has been widely used in many fields, such as remote sensing, medical diagnosis, food safety testing, environmental monitoring, and other fields due to its advantages of accurate and non-contact detection. However, conventional spectral imaging systems usually suffer from the large volume, long sampling time, and low energy efficiency. Metasurface is an artificial two-dimensional material that can flexibly control the amplitude, phase and spectrum of electromagnetic waves. Metasurfaces have been used in spectral detection, holography, metalens, and other fields due to its compact structure and the capacity to flexibly control the electromagnetic waves. Benefiting from the advantages of small size, compact structure, and easy integration, miniature spectral detection technologies based on metasurfaces have been widely studied in recent years. The miniature spectral detection systems usually utilize the broadband spectral properties of metasurfaces and compressive sensing algorithms to achieve computational spectral imaging detection with lightweight. However, the existing designs of the metasurfaces-based miniature spectral detection system usually lack the quantitative analysis of the relationship between the average correlation values of the metasurfaces transmission spectra and the reconstruction quality. The random selection method used in the existing design process cannot guarantee the optimal reconstruction quality. Different from the traditional methodology of using the maximum linear independence criterion to select the broadband filters, this paper quantitatively analyzes the relationship between the average correlation value of the metasurfaces transmission spectra and reconstruction quality, and proposes a methodology for miniature spectral detection based on metasurfaces, which provides a route for the subsequent design and optimization of the metasurfaces. In order to verify the advantages of the proposed methodology, ten broadband spectra and image spectra were selected from many spectra. Compared with the random selection design methodology, the proposed methodology can improve the reconstruction fidelity of broadband spectral and image signals. The fidelity of the broadband spectral reconstruction can be increased by 13.17%, and the reconstruction fidelity of the image spectral signals has also been improved to a certain extent. In addition, this paper also verifies the spectral properties of the metasurfaces-based miniature spectral detection technology, showing that the system has good reconstruction effect for broadband, narrowband and image spectral signals, and has the advantages of compact structure and small volume.

Yang G, Guo Y H, Pu M B, et al. Miniature computational spectral detection technology based on correlation value selection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(10): 220130; DOI: 10.12086/oe.2022.220130

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61875253, 61975210), National Key Research and Development Program (SQ2021YFA1400121), and the Chinese Academy of Sciences Youth Innovation Promotion Association (2019371)

¹State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ²School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Research Center on Vector Optical Fields, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

* E-mail: lxg@ioe.ac.cn