

# 偏振复用散射成像\*

赵富<sup>1)2)</sup> 胡渝曜<sup>1)2)</sup> 王鹏<sup>1)3)</sup> 刘军<sup>1)3)†</sup>

1) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

2) (中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

3) (张江实验室, 上海 201210)

(2023年4月7日收到; 2023年6月1日收到修改稿)

散斑相关成像因为记忆效应的要求, 通常需要空间非相干光源, 这使得成像装置变得复杂且光源利用率低, 同时也限制了这种方法在空间相干光源照射情况下的应用. 本文提出了一种基于空间相干光照明情况下, 通过复用不同偏振方向散斑图案实现的散斑相关成像新方法, 简称偏振复用散射成像. 新方法通过旋转放置在照射光路中的偏振器获得不同偏振方向的散斑图案, 再将这些图案叠加并平均, 最后使用相位恢复算法就可以重建物体图像. 与常规散斑相关成像技术的比较, 本文提出的方法降低了对光源的要求, 提高了光源的利用率, 使得装置更加简单紧凑. 实验结果表明这种方法的可行性, 并具有较强的环境适应性, 从而可拓展散斑相关成像方法的应用范围.

**关键词:** 散射成像, 偏振, 记忆效应, 自相关**PACS:** 42.25.Dd, 42.25.Ja, 42.30.-d, 42.30.Rx**DOI:** 10.7498/aps.72.20230551

## 1 引言

透过云雾、生物组织和海水等散射介质的成像在交通运输、医疗诊断和信息技术等方面具有广阔的应用前景, 因此利用散射成像得到高质量的图像一直都是研究者们目标. 研究人员已经提出不同技术来从经过散射介质的散射光中获得图像, 例如在光路中插入空间光调制器从而抵消散射介质随机相位影响的波前整形) 技术<sup>[1-3]</sup>、基于点扩散函数 (point spread function, PSF) 利用反卷积算法从散射图像中重构目标物体的反卷积成像<sup>[4-6]</sup>、通过测量散射介质传输矩阵从输出矩阵中恢复图像的传输矩阵测量法<sup>[7-9]</sup>. 近年来, 基于散射介质记忆效应 (memory effect, ME)<sup>[10]</sup> 的相关成像技术<sup>[11-14]</sup> 迅速发展, 这种方法通过对采集的散斑图案进行简单的自相关操作, 再利用相位恢复算法就可以重构

成像目标.

基于 ME 的散斑相关成像在成像过程只需要散斑图案, 不需要额外的装置和探测过程, 因此可以实现前面几种方法不具备的非侵入式单发成像. 不过这种方法对光源有要求, 需要空间非相干光. 原因是在 ME 范围内物体上的点会产生高度相关但位置偏移的随机散斑图案, 只有在空间非相干光的照射下, 不同散斑图案之间才不会干涉. 因此成像系统可以被视为非相干成像系统, 相机采集的图像是这些散斑图案的叠加, 也就是物体和 PSF 的卷积. 空间非相干光源一般是激光通过旋转扩散片获得<sup>[11]</sup> 或者经过窄带滤波的发光二极管<sup>[15]</sup>, 除此之外最近也有研究者使用很长的多模光纤得到空间低相干光<sup>[16]</sup>, 这些方式都是从空间相干特性出发调制光源. 但最近 Ma 等<sup>[17]</sup> 利用波长相关散斑复用技术在空间相干光的条件下实现了散斑自相关成像, 通过叠加不同波长的散斑图案实现了散斑

\* 上海市自然科学基金 (批准号: 20ZR1464500) 和上海市市级科技重大专项 (批准号: 2017SHZDZX02) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [jliu@siom.ac.cn](mailto:jliu@siom.ac.cn)

相关成像, 这种方法从新的角度即光源的波长特性来实现散斑成像相关成像. 偏振同样是光的另一个重要特征参量, 而且光的偏振特性也可以很方便地进行调控和测量, 在散射成像领域也有重要应用前景. 孙雪莹等<sup>[18]</sup>利用散斑中目标与背景的偏振信息差异性与独立性, 结合光场的偏振共模抑制特性, 可以消除背景噪声实现宽光谱散射成像.

本文从光的偏振特性出发, 通过叠加不同偏振方向的散斑图案实现了在空间相干光源下的散斑相关成像. 这种方法对光源的相干性等要求进一步降低, 仅需通过旋转偏振器得到不同偏振方向的散斑图案, 通过叠加多个散斑图案消除相干噪声, 这使得散射相关成像的应用范围更加宽广.

## 2 理论与方法

在散斑相关成像系统中, 光源通常是空间非相干光, 在散射介质的 ME 范围内时, 相机拍摄的散斑图案  $I$  是物体  $O$  与系统 PSF 即  $S$  的卷积:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} O(r) S(r - \Delta r) d^2r = O * S, \quad (1)$$

式中  $*$  表示卷积运算,  $r$  表示物体空间坐标,  $\Delta r$  表示相机传感器空间坐标.

物体信息隐藏在散斑图案中, 为了恢复其信息, 需要对散斑图案进行自相关操作:

$$[I \otimes I] = [O * S] \otimes [O * S] = [O \otimes O] * [S \otimes S], \quad (2)$$

式中  $\otimes$  表示自相关操作.

散斑图案在空间中是随机分布的, 因此其本身的自相关是一个脉冲函数<sup>[19]</sup>, 即  $[S \otimes S] = \delta(r)$ , 此时 (2) 式变为

$$[I \otimes I] \approx [O \otimes O]. \quad (3)$$

根据 Wiener-Khinchin 定理, 物体的能量谱等于物体自相关的傅里叶变换振幅大小, 即:

$$|F\{O\}|^2 = F\{O \otimes O\} = F\{I \otimes I\}. \quad (4)$$

最后使用相位恢复算法<sup>[20]</sup>从能量谱中重建物体图像. 本研究采用了两种相位检索算法, 即误差减小算法<sup>[21]</sup>和混合输入输出算法<sup>[21]</sup>. 本实验采用了融合误差减小和混合输入输出算法的乒乓算法<sup>[22,23]</sup>来快速并高质量地重建目标.

当光源为空间相干光时, 光源中的相干部分会干涉产生背景噪声, 此时相机拍摄的散斑图案  $I_{\text{inco}}$  为

$$I_{\text{inco}} = O * S + N, \quad (5)$$

式中  $N$  代表相干噪声.

为了消除相干噪声, 复用不同偏振方向光源拍摄的散斑图案可得

$$I_{\text{all}} = \sum_{p=1}^P O * S + N_p = \sum_{p=1}^P O * S + \sum_{p=1}^P N_p, \quad (6)$$

式中  $p$  表示偏振光为第  $p$  个方向,  $N_p$  表示第  $p$  个方向的偏振光干涉产生的背景噪声,  $P$  为散斑图案的总数量.

当对叠加的散斑图案  $I_{\text{all}}$  取平均时, 可以得到

$$I_{\text{new}} = \frac{I_{\text{all}}}{P} = O * S + C \approx O * S, \quad (7)$$

式中  $C$  表示被平均后的噪声, 当复用的散斑数量  $P$  足够大时,  $C$  将为常数. 此时的散斑图案和空间非相干光源时的散斑一样, 最后就可从中恢复出物体的图案. 为了实现这种退相干, 以前的方法是使用旋转的散射介质产生随时间变化的散斑图案, 在相机的快门时间内积分来消除相干噪声; 或者复用不同波长的波长相关散斑图案来实现, 本文则是通过复用不同偏振方向光源拍摄的散斑图案来消除相干噪声, 为实现散射成像提供一个新思路.

## 3 实验装置和结果

实验装置示意如图 1 所示, 光源为多通道光纤耦合激光器 (RGB-637/532/450/405 nm-160 mW-CNI), 实验中选择使用 637 nm 的光通过多模光纤输出到准直透镜. 由于使用的多模光纤长度仅为 1 m, 因此准直后的光具有各个方向的偏振分量, 呈现出自然光的特点, 且仍然保持较好的空间相干性. 准直后的光经过格兰-泰勒偏振器变为线偏光并照射分辨率板 (Negative 1951 USAF Test Target, ThorLabs) 上, 分辨率板上的数字“9”被选为成像物体. 散射介质为磨砂玻璃 (DG20-220, ThorLabs), 最后通过 sCOMS 相机 (Dhyana 401DS, Tucsen) 收集产生的散斑图案. 实验中物体与散射介质距离  $d_0$  和散射介质与相机的距离  $d_i$  分别是 300 mm 和 150 mm.

在进行散射成像之前, 将散射介质换为焦距  $f = 100$  mm 的凸透镜, 正好满足凸透镜成像规律  $1/f = 1/d_0 + 1/d_i$ , 物体成像到相机上如图 2(a2) 所

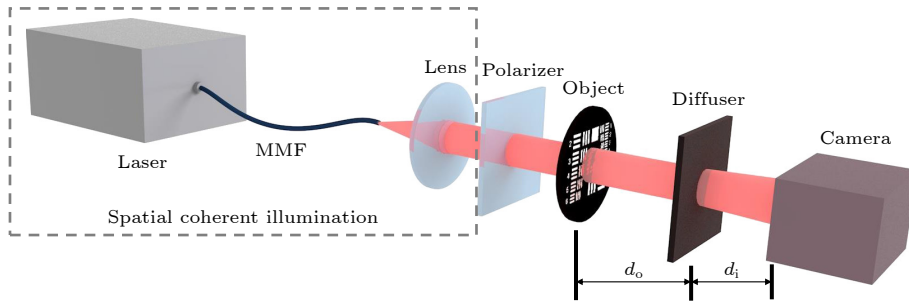


图 1 通过散射介质成像的光学装置

Fig. 1. Optical setup used for imaging through the scattering media.

示. 为了验证空间相干光对散斑相关成像的影响, 首先移去偏振器, 此时光源各个方向都有偏振态, 相机拍摄的散斑图案如图 2(b1) 所示; 再将偏振器放回光路, 相机采集到的线偏振光源的散斑图案如图 2(c1) 所示. 对这两种光源条件下的散斑图案进行自相关操作, 分别如图 2(b2) 和图 2(c2) 所示. 与物体的自相关图 2(a1) 对比, 这两种情况的自相关包含的信息明显较少, 再使用相位恢复算法重建图案, 得到结果 (图 2(b3) 和图 2(c3)) 不能辨认出原始的物体, 这表明光源的空间相干性对散斑相关成像的应用有很大的限制.

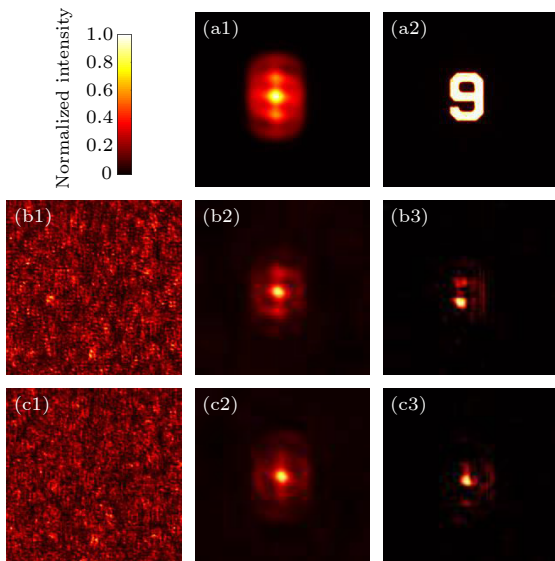


图 2 空间相干光散斑相关成像 (a1), (b2), (c2) 自相关; (a2) 物体; (b1), (c1) 散斑图案; (b3), (c3) 重建图案

Fig. 2. Speckle correlation imaging with spatially coherent light: (a1), (b2), (c2) The autocorrelation; (a2) the object; (b1), (c1) speckle pattern; (b3), (c3) reconstruction pattern.

为了实现空间相干光条件下的散斑相关成像, 需要拍摄不同偏振方向光源的散斑图案. 本实验旋转偏振器, 每间隔  $10^\circ$  采集散斑图像. 复用散斑图

案的前提是这些散斑图案相关, 偏振器旋转不同角度的散斑相关性分布如图 3 所示. 根据图 3 可知, 旋转偏振器后相关性开始时大幅下降, 后面保持在相关系数约为 0.5, 这和预想的情况有些出入. 正常来说旋转  $180^\circ$  和  $360^\circ$  应该与  $0^\circ$  的散斑图案一样, 相关系数应为 1, 且周围相邻的散斑图案相关性也应比较大. 但在实际实验中, 多模光纤可能会受到扰动, 导致输出光斑有变化; 实验中的格兰-泰勒偏振器, 可能也会引入影响, 这就导致后面同样偏振方向的散斑图案相关性降低. 虽然受限于实验条件, 实验中获得的不同偏振散斑相关性相对较低, 但是总体来说, 实验中的这些不同偏振方向的散斑图案相关性依然可以满足相关成像的要求, 这同时表明了该方法的适用条件范围及可靠性. 最后将这些不同偏振方向的散斑图案叠加后平均, 先分别间隔  $10^\circ$  和  $20^\circ$  复用 18 张散斑图案得到图 4(c1) 和图 4(d1) 的散斑图案, 进行自相关操作后分别得到图 4(c2) 和图 4(d2), 其与 1 张线偏振光的散斑图案得到图 4(b2) 相比所包含的信息更多, 更接近物体的自相关 (图 4(a1)). 再利用相位恢复算法

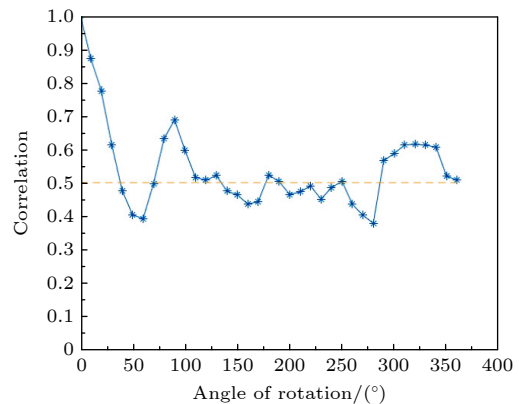


图 3 不同偏振方向的散斑相关性

Fig. 3. Speckle correlation of different polarization directions.

可重建出图形, 图 4(b3) 显示 1 张散斑图案恢复不出物体图案, 而图 4(c3) 和图 4(d3) 显示复用 18 张散斑图案就可以重建出物体, 且间隔不同角度恢复出的物体的清晰度相同, 这表明复用散斑图案的偏振间隔角度大小对恢复结果影响不大. 继续增加复用散斑图案的数量, 复用 36 张偏振间隔角度为  $10^\circ$  的散斑图案, 最终重建的图像更加清晰, 细节更加丰富的图 4(e3). 这说明复用数量更多的散斑图案, 可以得到重建质量更好的图像.

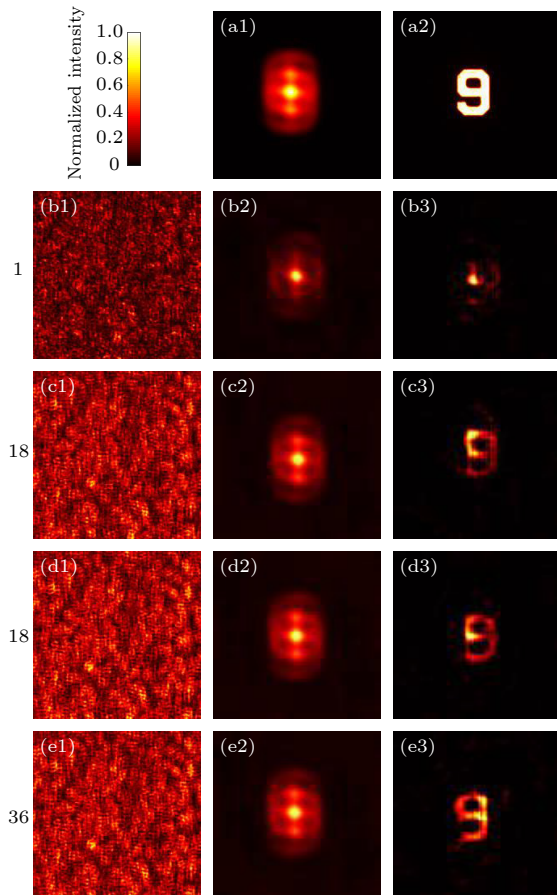


图 4 偏振复用散射相关成像 (a1), (b2), (c2), (d2), (e2) 自相关; (a2) 物体; (b1), (c1), (d1), (e1) 散斑图案; (b3), (c3), (d3), (e3) 重建图案

Fig. 4. Polarization multiplexed speckle correlation imaging: (a1), (b2), (c2), (d2), (e2) The autocorrelation; (a2) the object; (b1), (c1), (d1), (e1) speckle pattern; (b3), (c3), (d3), (e3) reconstruction pattern.

## 4 讨论

本文通过采集不同偏振方向的散斑图案, 实现了在空间相干光条件下的散斑相关成像, 拓展了散斑相关成像光源选择的范围. 对比波长相关散斑复用 (WDSM) 技术, 同样是复用散斑图案, 本实验

只需偏振器, 对光源无特别要求, 因此更简单. 但也有与这种方法相同的缺点, 由于是复用散斑图案, 失去了单发成像的能力. 实验中对比了不同偏振方向的散斑图案, 可以发现偏振方向差别加大的散斑图案, 相关性仍然很高, 具有较强的环境适应性; 受到干扰后的同偏振方向散斑图案也保持着较高相关性, 因此预计不仅在静态的散射介质可以使用这种方法, 动态的散射介质和基于浴帘效应<sup>[24]</sup>的相关成像应该同样也适用, 这需要进一步探索.

## 5 结论

不同于之前的散斑相关成像方法, 本文提出了一种通过复用不同偏振方向散斑图案, 实现了在空间相干光条件下的散斑相关成像的新方法. 搭建原理验证性实验, 通过旋转偏振器, 分别实验采集了 18 张和 36 张不同偏振方向的散斑图案, 采用高效的乒乓算法, 重建获得了清晰的图像, 并且发现复用更多不同偏振方向的散斑图案, 可以得到重建质量更好的图像. 这些实验结果都表明这种方法的可行性, 并具有较强的环境适应性, 从而可拓展散斑相关成像方法的应用范围.

## 参考文献

- [1] Vellekoop I M, Mosk A P 2007 *Opt. Lett.* **32** 2309
- [2] Katz O, Small E, Silberberg Y 2012 *Nat. Photonics* **6** 549
- [3] Mosk A P, Lagendijk A, Leroose G, Fink M 2012 *Nat. Photonics* **6** 283
- [4] Zhuang H C, He H X, Xie X S, Zhou J Y 2016 *Sci. Rep.* **6** 32696
- [5] Edrei E, Scarcelli G 2016 *Sci. Rep.* **6** 33558
- [6] Xie X S, Zhuang H C, He H X, Xu X Q, Liang H W, Liu Y K, Zhou J Y 2018 *Sci. Rep.* **8** 4585
- [7] Popoff S M, Leroose G, Carminati R, Fink M, Boccardi A C, Gigan S 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 100601
- [8] Popoff S, Leroose G, Fink M, Boccardi A C, Gigan S 2010 *Nat. Commun.* **1** 81
- [9] Hofer M, Brasselet S 2019 *Opt. Lett.* **44** 2137
- [10] Freund I, Rosenbluh M, Feng S 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2328
- [11] Katz O, Heidmann P, Fink M, Gigan S 2014 *Nat. Photonics* **8** 784
- [12] Li X H, Greenberg J A, Gehm M E 2019 *Optica* **6** 864
- [13] Song P M, Jiang S W, Zhang H, Bian Z C, Guo C F, Hoshino K, Zheng G A 2019 *Opt. Lett.* **44** 3645
- [14] Horisaki R, Okamoto Y, Tanida J 2019 *Opt. Lett.* **44** 4032
- [15] Yang W Q, Li G W, Situ G H 2018 *Sci. Rep.* **8** 9614
- [16] Ma R, Wang Z, Zhang H H, Zhang W L, Rao Y J 2020 *Opt. Lett.* **45** 4352
- [17] Ma R, Wang Z, Wang W Y, Zhang Y, Liu J, Zhang W L, Gomes A S L, Fan D Y 2021 *Opt. Lasers Eng.* **141** 106567
- [18] Sun X Y, Liu F, Duan J B, Niu G T, Shao X P 2021 *Acta*

- Phys. Sin.* **70** 224203 (in Chinese) [孙雪莹, 刘飞, 段景博, 牛耕田, 邵晓鹏 2021 物理学报 **70** 224203]
- [19] Goodman J W 2006 *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* (Roberts and Company Publishers) pp66–77
- [20] Bertolotti J, Van Putten E G, Blum C, Lagendijk A, Vos W L, Mosk A P 2012 *Nature* **491** 232
- [21] Fienup J R 1982 *Appl. Optics* **21** 2758
- [22] Hofer M, Soeller C, Brasselet S, Bertolotti J 2018 *Opt. Express* **26** 9866
- [23] Xiao X, Du S M, Zhao F, Wang J, Liu J, Li R X 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 034201 (in Chinese) [肖晓, 杜舒曼, 赵富, 王晶, 刘军, 李儒新 2019 物理学报 **68** 034201]
- [24] Edrei E, Scarcelli G 2016 *Optica* **3** 71

## Polarization multiplexing scattering imaging<sup>\*</sup>

Zhao Fu<sup>1)2)</sup> Hu Yu-Yao<sup>1)2)</sup> Wang Peng<sup>1)3)</sup> Liu Jun<sup>1)3)†</sup>

1) (State Key Laboratory of High Field Laser Physics,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2) (College of Materials Science and Opto-Electronic Technology,

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Zhangjiang Laboratory, Shanghai 201210, China)

( Received 7 April 2023; revised manuscript received 1 June 2023 )

### Abstract

Imaging through scattering media, such as clouds, biological tissues, and seawater, has broad application prospects in transportation, medical diagnosis, and information technology. Researchers have proposed various techniques to obtain images from scattered light passing through the scattering media, among which speckle correlation imaging has developed rapidly. Speckle correlation imaging requires non-coherent light sources due to the requirement of memory effect. This requirement makes the imaging device complex, and the light source utilization rate low. Additionally, this method is limited in its application under the illumination of spatially coherent light sources. This paper proposes a new method of speckle correlation imaging based on the illumination of spatially coherent light, which is achieved by multiplexing different polarization direction speckle patterns, called polarization multiplexing scattering imaging. To achieve the decoherence of the light source, previous approaches have used a rotating scattering medium to generate time-varying speckle patterns that are integrated over the shutter time of the camera to eliminate coherent noise, or multiplexed wavelength-dependent speckle multiplexing to achieve this. This paper uses spatially incoherent light sources to obtain different polarization direction speckle patterns by rotating polarizers placed in the illumination path. These patterns are superimposed and averaged, and phase recovery algorithm is used to reconstruct the object image. This experiment uses Ping-Pang (PP) algorithm with fusion error reduction and hybrid input-output algorithm to reconstruct targets quickly and with high quality. The comparison of the reconstruction results of different numbers of reused speckle patterns demonstrates that using more speckle patterns can achieve better image quality. Compared with conventional speckle correlation imaging technology, the proposed method reduces the requirements of light sources, improves the utilization rate of light sources, and makes the device simpler and more compact. Experimental results show that this method is feasible and has strong environmental adaptability, which can expand the application scope of speckle correlation imaging methods.

**Keywords:** scattering imaging, polarization, memory effect, autocorrelation

**PACS:** 42.25.Dd, 42.25.Ja, 42.30.-d, 42.30.Rx

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230551

\* Project supported by the Natural Science Foundation of Shanghai Municipal, China (Grant No. 20ZR1464500) and the Science and Technology Major Project of Shanghai Municipal, China (Grant No. 2017SHZDZX02).

† Corresponding author. E-mail: [jliu@siom.ac.cn](mailto:jliu@siom.ac.cn)



## 偏振复用散射成像

赵富 胡渝曜 王鹏 刘军

### Polarization multiplexing scattering imaging

Zhao Fu Hu Yu-Yao Wang Peng Liu Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 154201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230551

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230551>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于散斑光场偏振共模抑制性的宽谱散射成像技术

Broadband scattering imaging technology based on common-mode rejection of polarization characteristic

物理学报. 2021, 70(22): 224203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210703>

基于赝热光照明的单发光学散斑成像

Single-shot optical speckle imaging based on pseudothermal illumination

物理学报. 2019, 68(3): 034201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181723>

浅海被动水下偏振成像探测方法

Passive underwater polarization imaging detection method in neritic area

物理学报. 2018, 67(18): 184202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180692>

偏振成像激光雷达与短波红外复合光学接收系统设计与分析

Design and analysis of polarization imaging lidar and short wave infrared composite optical receiving system

物理学报. 2020, 69(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200920>

基于偏振的暗通道先验去雾

Polarization-based research on a priori defogging of dark channel

物理学报. 2022, 71(14): 144202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220332>

基于稀疏低秩特性的水下非均匀光场偏振成像技术研究

Clear underwater vision in non-uniform scattering field by low-rank-and-sparse-decomposition-based polarization imaging

物理学报. 2021, 70(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210314>