

doi:10.3788/gzxb20184704.0422003

利用 MAP 评估提高表面等离子体结构光照明 技术成像质量

余慕欣,周文超,吴一辉

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,长春 130033)

摘 要:经典的恢复算法不能有效地恢复被观测物的全频域信息,空间频率的缺失导致超分辨图像伴有较为严重的旁瓣.本文提出利用最大后验概率(MAP)评估解决表面等离子体结构光照明技术中的光学旁瓣问题.结果表明 MAP 评估恢复算法可以有效恢复物质的高空间频率信息,并且通过合理选择优化参数达到抑制光学旁瓣的目的.在波长 520 nm,数值孔径 1.3 下,可获得半高全宽 65 nm 的横向分辨率,约为传统荧光显微镜的 3.6 倍.该技术在生命科学观测中具有潜在应用价值.

关键词:显微;荧光显微;超分辨;表面等离子体;金属光学;图像重建技术

中图分类号:O433.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)04-0422003-7

Improving the Imaging Performance of Plasmonic Structured Illumination Microscopy Using MAP Estimation Method

YU Mu-xin, ZHOU Wen-chao, WU Yi-hui

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130033, China)

Abstract: The classical restoration algorithm can not effectively recover the full frequency domain information of the object, which leads to the serious optical sidelobes. In this paper, the application of metal nano arrays in structured light illumination is studied, and the problem of optical sidelobes in plasmonic structured illumination microscopy is solved using Maximum A Posteriori (MAP) estimation. The research shows that the MAP estimation method can effectively restore the high spatial frequency information, and through the reasonable selection of optimization parameters to achieve the purpose of suppressing optical sidelobes. At the wavelength of 520 nm, 1.3 numerical aperture, the lateral resolution can be obtained at FWHM of 65 nm, which is about 3.6 times of the traditional fluorescence microscope. This technology has potential application application in the field of life science.

Key words: Microscopy; Fluorescence microscopy; Superresolution; Surface plasmons; Metal optics; Image reconstruction techniques

OCIS Codes: 220.2945; 180.2520; 100.6640; 240.6680; 260.3910; 100.3010

0 引言

荧光显微镜在生命科学研究中扮演着重要角色.然而受阿贝衍射极限制约^[1],经典光学显微镜的分辨率被限制在照明波长的二分之一.突破衍射极限,实现对生命过程亚细胞甚至分子尺度的动态观测具有重要意

基金项目:吉林省科技发展计划(Nos.20150520110JH,20170414015GH),吉林省产业技术研究与开发专项(No.2015Y028)资助

第一作者:余慕欣(1985-),男,博士研究生,主要研究方向为表面等离子体光学.Email:mxyuhit@hotmail.com

导师(通讯作者):吴一辉(1965-),女,研究员,博士生导师,主要研究方向为微光机电.Email:yihuiwu@ciomp.ac.cn

收稿日期:2017-09-21;**录用日期:**2017-11-24

<http://www.photon.ac.cn>

义.结构光照明技术(Structured Illumination Microscopy, SIM)^[2-15]是近年发展起来的超分辨成像技术.不同于传统荧光显微镜采用均匀光照明物质,SIM利用双光束干涉形成的正弦光照明物质,将物质位于光学传递函数截止频率外的高频信息转移成像,通过后处理技术重构出超分辨图像.不过SIM照明条纹的空间频率仍然受衍射极限限制,导致成像分辨率仅为传统荧光显微镜的2倍^[2].

表面等离子体激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)^[16-18]是光与自由电子相互作用沿金属表面传播的电子疏密波,具有强电磁局域化、近场电场增强和亚波长传输等新颖光学特性,SPPs特别适用于超分辨成像.表面等离子体结构光照明技术(Plasmonic Structured Illumination Microscopy, PSIM)将SIM和SPPs结合起来^[8-11],将SPPs干涉得到的极高空间频率的干涉条纹作为照明图案,采用该照明方式系统的成像分辨率可达普通荧光显微镜的2.5~3倍.高损耗是SPPs的固有缺点^[16],一方面损耗会降低SPPs的传输距离导致视场受限^[8],另一方面损耗会引起照明条纹畸变带来图像处理上的困难,重构的超分辨图像常伴有严重的光学旁瓣^[8-11].

最大后验概率(Maximum A Posteriori, MAP)评估广泛应用于多帧图像的亚像素重构^[19].它引入先验信息模型,综合利用多幅数字图像的互补信息,提高图像的空间解像力和清晰度.近年,F. ORIEUX首先将Bayesian原理引入结构光照明图像恢复技术,用于压缩原始图像帧数,提高时间分辨率^[20].T. LUKEs等进一步发展该方法.他们采用基于MAP评估的图像恢复算法降低结构光照明技术对照明条纹位置精度的要求^[21].J. L. PONSETTO等利用局域表面等离子体干涉照明解决PSIM视场受限问题,不过重构的超分辨图像仅包含0级和±1级谐波分量转移的空间频率信息,在某些方向上空间频率的缺失会引起严重的光学旁瓣,点扩散函数中一级旁瓣的幅值约为主峰幅值的一半,会降低成像性能^[10].本文研究金属纳米阵列在结构光照明技术中的应用,提出采用MAP恢复算法解决复杂模式干涉下超分辨图像恢复中的旁瓣问题.该方法不仅可以恢复物质的高空间频率信息,而且通过合理选择参数可以抑制光学旁瓣.研究结果表明在波长520 nm,数值孔径1.3下,可以得到半高宽分辨率65 nm的各向均匀的超分辨图像,约为传统荧光显微镜分辨率的3.6倍.

1 原理

表面等离子体结构光照明技术的原理如图1.它是在普通e-pi显微镜的基础上引入空间光调制器和金属光栅来实现的.一束波长520 nm的激光经过整形、扩束和起偏后作用到空间光调制器.空间光调制器的材质为硅上液晶,简称LCoS SLM或SLM.SLM对入射的偏振光进行幅值调制,通过独立控制SLM各个像素的开关可以实现对衍射光束方向和初始相位的精确控制^[15].衍射光束的能量集中在0和±1级次.挡光平板(图中用Mask表示)对衍射光束进行空间滤波,它仅允许±1级次衍射光束通过.金属光栅激励起的SPPs会干涉形成照明条纹.照明条纹和荧光分子作用激发出的荧光经过物镜传输到位于远处的sCMOS成像.金属光栅的结构如图1插图(a),它由基底、光栅区和隔离层三部分构成.考虑到材料的光学特性和工艺兼容性,选择氧化锌(ZnO)作为基底以及隔离层材料,光学参数 $\epsilon_{\text{ZnO}} = 4$ ^[22];金属银(Ag)作为光栅材料,光学参数 $\epsilon_{\text{Ag}} = -11 + 0.33i$ ^[23],光栅区的填充介质为有机玻璃(PMMA),介电常数 $\epsilon_{\text{PMMA}} = 2.3$.光栅是二维的,成正方形晶格分布,光栅周期 $\Lambda = 300$ nm,单个纳米柱尺寸为 180×180 nm²;光栅区厚度50 nm,隔离层厚度20 nm,物平面到隔离层上表面距离25 nm.引入隔离层是

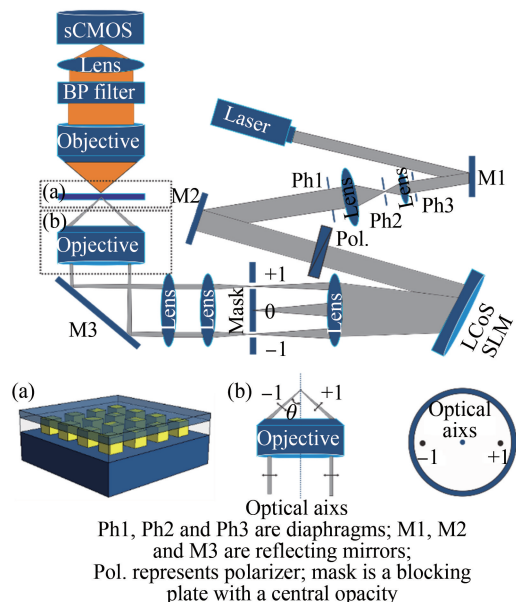


图1 表面等离子体结构光照明技术的原理示意图
Fig. 1 Schematic geometry of the plasmonic structured illumination microscopy

为了避免局域 SPPs 电场异常增强导致荧光分子光漂白,同时也为避免金属银与环境直接接触发生氧化.±1 级次衍射光束经过物镜后波矢和偏振方向的变化如图 1 插图(b).它们平行于光轴方向进入物镜的后焦面,经物镜折射后重新会聚到焦平面,改变入射光和光轴间的距离可以有效控制出射光和光轴的夹角 θ ,理论上出射角的变化范围可从垂直出射到掠出射.光束的偏振方向如图 1 插图(b)箭头方向所示,入射光束是线偏振光,经物镜折射后,出射光束变为角向偏振.在光束直径足够小时,出射光束可简化成线偏振光处理^[2-3].两束光的初始相位 $\Delta\varphi$ 由空间光调制器控制^[15].

金属光栅激励起的照明条纹的光强分布由瑞利模型描述^[24]为

$$I(r) = \left| \left[\exp(ik_{\text{inc}1} \cdot r + \Delta\varphi) + \exp(ik_{\text{inc}2} \cdot r - \Delta\varphi) \right] \sum_{n,m \in \mathbb{Z}^2} A_{n,m} \exp(iK_{n,m} \cdot r) \right|^2 \quad (1)$$

式中, $k_{\text{inc}1}$ 和 $k_{\text{inc}2}$ 分别对应±1 级次衍射光束在 x - y 平面上的投影波矢, $k_{\text{inc}1} = k_x \mathbf{e}_x + k_y \mathbf{e}_y$, $k_{\text{inc}2} = -k_x \mathbf{e}_x - k_y \mathbf{e}_y$; $K_{n,m}$ 是光栅的倒格矢, $K_{n,m} = n(2\pi/\Lambda) \mathbf{e}_x + m(2\pi/\Lambda) \mathbf{e}_y$; $A_{n,m}$ 是瑞利级数; $\Delta\varphi$ 是初始相位.通过改变入射角度或者初始相位可以获得不同的照明条纹.这里以垂直入射为例介绍表面等离子体结构光照明技术的成像过程,其它的激励条件会获得类似的结论,不过表示形式将变得较为复杂.设 $k_x = 0$, $k_y = 0$ 和 $\Delta\varphi = 0$, 此时照明条纹的光强分布为

$$I(r) = \sum_{n,m \in \mathbb{Z}^2} B_{n,m} \exp(iK_{n,m} \cdot r) \quad (2)$$

式中 $B_{n,m} = \sum_{\substack{\rho^1 - q^1 = n \\ \rho^2 - q^2 = m}} A_{\rho^1, \rho^2} \cdot A_{q^1, q^2}^*$, 它是照明条纹的第 (m, n) 阶傅里叶级数.

照明条纹与荧光分子作用,激发出的荧光由 sCMOS 接收成像,成像过程表示为

$$g(r) = [I(r) \text{obj}(r)] \otimes h(r) \quad (3)$$

式中 $\text{obj}(r)$ 表示荧光分子的空间分布, $g(r)$ 表示原始图像, $h(r)$ 是点扩散函数, \otimes 表示卷积运算符.带入式(2)到式(3),并做傅里叶变换可以得到

$$G(k) = \sum_{n,m \in \mathbb{Z}^2} B_{n,m} \text{Obj}(k - K_{n,m}) H(k) \quad (4)$$

式中 $\text{Obj}(k)$ 表示荧光分子的傅里叶分布, $G(k)$ 表示原始图像的傅里叶空间分布, $H(k)$ 是光学传递函数.

讨论金属光栅的近场衍射特点.作为对比,额外构造一面介质光栅,它和金属光栅的结构和材料参数相同,仅将金属材料(Ag)替换成介质材料(ZnO).图 2(a)和(b)分别给出金属光栅和介质光栅照明条纹的光强分布 $(|E|^2)$, 计算采用严格耦合波算法(RCWA).对比可知,得益于局域表面等离子体的电场增强效应,光强在近场区域尤其是金属柱棱角附近得到增强,金属光栅的光强极值约为介质光栅的 2.5 倍.照明条纹傅里叶谐波信号的分布 $(B_{n,m} | n=0)$ 如图 2(c)所示,图中“·”表示金属光栅的幅值分布,“*”代表介质光栅的幅值分布.对比可知受周期结构的调制,增强的光强会增强其谐波信号尤其高阶谐波信号.

式(4)表明照明条纹的谐波分量 $B_{n,m} \exp(iK_{n,m} \cdot r)$ 会使荧光分子的傅里叶分布 $\text{Obj}(k)$ 发生平移,平移后的分量 $\text{Obj}(k - K_{n,m})$ 经后续光路贡献于成像.成像系统可以接收原本位于 $H(k)$ 截止频率之外的高空间频率信息,这样等效地拓展了成像系统的空间频率响应带宽,从而获得超越衍射极限的分辨力. $\text{Obj}(k - K_{n,m})$ 对成像的贡献程度由谐波分量的强度 $|B_{n,m}|$ 决定,金属光栅能有效增强谐波信号尤其是高阶谐波信号的强度,使物质更高频率信息移频成像,从而进一步提高 SIM 的成像分辨力.另外, sCMOS 得到的原始图像的各个频率分量是叠加在一起的,为恢复出超分辨率图像需要多帧原始图像^[2-3].不同原始图像可以通过调整衍射光的入射角度、初始相位等参数获得.需要注意的是 SPPs 的电场增强效果与金属阵列的结构和照明条件密切相关.表面等离子体的腔模共振可以有效提高电场的增强因子,不过它对入射角度有严格的要求^[25],为此在光路中添加空间光调制器,通过引入新的参数 $\Delta\varphi$ 可在同一入射角下获得额外的原始图像.图像恢复所需原始图像的数量可由 $(r_{\text{wide-field}}/r_{\text{super-resolution}})^2$ 估计,其中, $r_{\text{wide-field}}$ 和 $r_{\text{super-resolution}}$ 分别对应宽场照明和结构光照明下的成像分辨力.

经典的基于线性移频的结构光恢复算法从式(4)出发,从多幅原始图像中提取 $\text{Obj}(k - K_{n,m})$, 并做频域融合获得超分辨图像.不过,金属光栅衍射形成的照明条纹含有复杂的谐波分量,经典恢复算法并不适用此类问题求解. PONSETTO J L 等获得的超分辨图像仅包含 0 级和±1 级谐波分量转移的物质空间频率信息,在某些方向上空间频率的缺失会造成严重的旁瓣,点扩散函数中一级旁瓣的幅值可达主峰幅值的一半,这会

降低系统的成像性能.本文从式(3)出发,利用 MAP 评估算法进行图像恢复,用于重构出低旁瓣的各向均匀的超分辨图像.

这里讨论更一般的情况,成像过程中引入噪声,式(3)可表示成

$$g_k(r) = [I_k(r) \text{obj}(r)] \otimes h(r) + n_k \quad (5)$$

式中 I_k 、 g_k 和 n_k 分别对应第 k 幅图像的照明条纹、初始图像和噪声.数字图像采集的噪声主要来自光子噪声和电子噪声,光子噪声服从泊松分布,电子噪声服从高斯分布.充分照明下,图像噪声服从均值为零的高斯分布,噪声的方差为 σ^2 ^[27].在高斯噪声下,MAP 评估图像恢复的代价函数为^[19]

$$\text{obj}'(r) = \text{argmin} \left[\sum_k ||g_k(r) - h(r) \otimes [I_k(r) \text{obj}(r)]||^2 + \gamma ||L \text{obj}(r)||^2 \right] \quad (6)$$

式中 $\text{obj}'(r)$ 为被逼近的荧光分子的空间分布, L 是正则化算符, γ 是正则化参数,“ $|| \cdot ||$ ”为二范数.式(6)中右边第一项表示原始图像和标准图像的方差,用于评价 $\text{obj}'(r)$ 的真实度;第二项是正则项,用于保证计算的收敛性,这里正则化算符选用负 Laplace 算符^[19];正则化参数 γ 用于调整两项间的权重.代价函数是需要优化的目标函数,它是一个凸函数,这里我们采用标量共轭梯度算法(Scaed Conjugate Gradient, SCG)迭代求解 $\text{obj}'(r)$,其收敛数值即认为是荧光分子的真实空间分布.在实际求解过程中, $h(r)$ 并非是稀疏矩阵,为提高计算速度和减小内存占用,式(6)中的卷积运算由快速傅里叶运算完成.

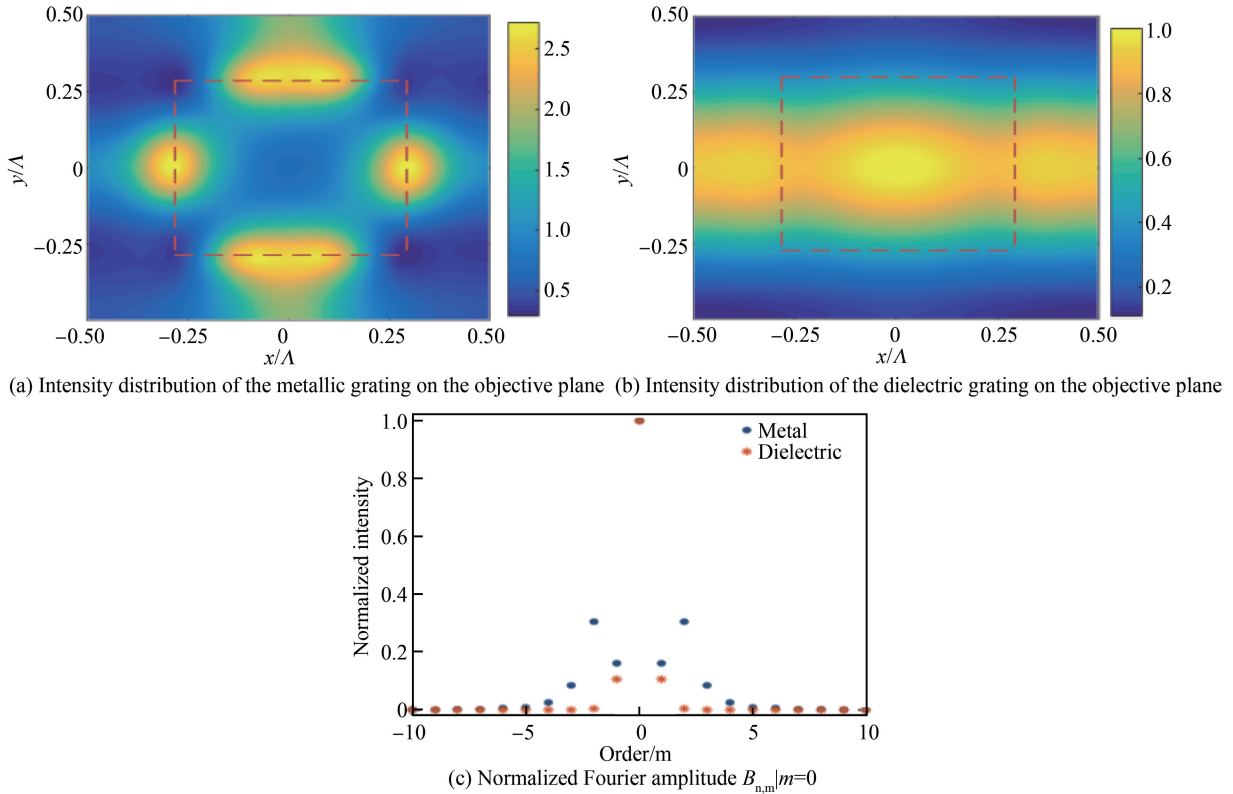


图 2 金属光栅的近场衍射特点

Fig.2 Near-field diffraction properties of the metallic grating on the object plane

2 结果和讨论

讨论系统的亚波长成像性能.首先给出单荧光分子的亚波长成像结果,假定荧光分子的尺寸等于一个像素点 $5 \times 5 \text{ nm}^2$,如 scFvs 荧光蛋白.荧光分子的尺寸远小于成像分辨力,可将其看作理想的点光源,通过图像处理可以重构得到点扩散函数.图 3(a)和(b)分别给出了宽场照明和结构光照明下的点扩散函数;图 3(c)是 MAP 评估直接迭代计算得到点扩散函数.MAP 评估直接计算得到的结果一级旁瓣的幅值约为主峰幅值的 $1/10$,并且含有负旁瓣,这些不好的信号可用 Lukosz 函数作频域滤波后消除,滤波后的图像如图 3(b)所示.图 3(d)和图 3(e)分别对应宽场照明和结构光照明下的光学传递函数,这里对光学传递函数幅值取对数处理.对比可知,MAP 算法可以有效恢复出物质的高频信息.图 3(f)给出了图 3(a)~(c)沿 x 轴上的光强分布,

这里,点划线对应宽场照明条件;虚线对应滤波前的超分辨图像;实线对应滤波后的超分辨图像,点扩散函数的半高全宽 FWHM 分别为 240 nm、62 nm 和 65 nm.这里对图像的高频信息进行了轻微切趾,这略微降低了成像的分辨率,不过能够有效抑制负旁瓣等不利信息.采用 MAP 评估的图像恢复算法可以得到一个低旁瓣的各向均匀的超分辨图像,获得 FWHM 分辨率 65 nm,约为传统荧光显微镜的 3.6 倍.

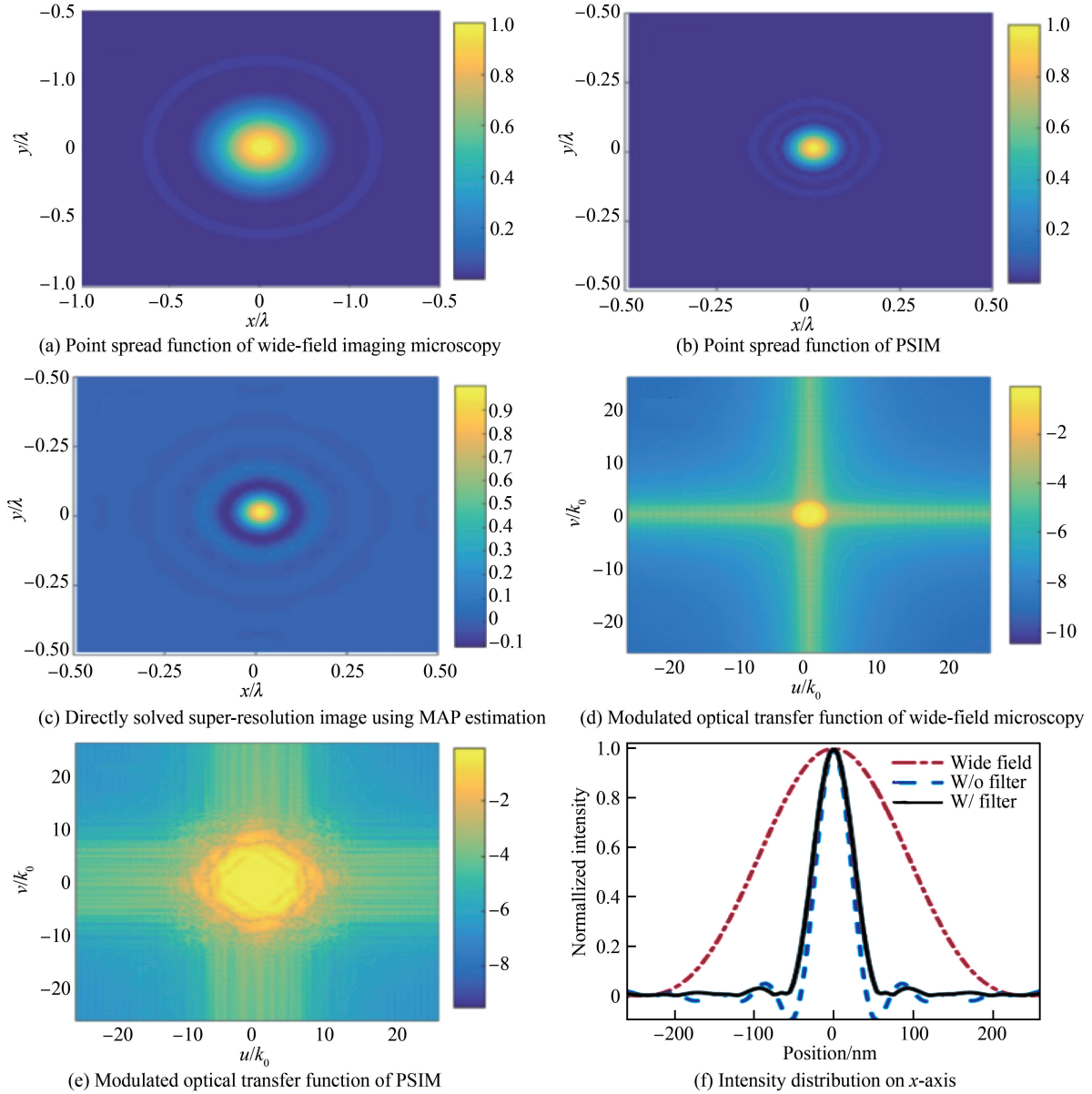


图 3 表面等离子体结构光照技术的亚波长成像性能
Fig.3 Sub-wavelength imaging performance of PSIM

这里,给出系统在瑞利判据下的成像分辨率.图 4(a)给出了两个相距 70 nm 的荧光点的成像结果;图 4(b)是白色虚线上的光强分布.对称中心上的光强相比主峰光强下降了约 35%,所成的像对比度 V 约为 0.2,其中, $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, I_{\max} 与 I_{\min} 分别对应于波峰与波谷的光强强度.在瑞利判据下,可以清晰分辨两个相距 70 nm 的荧光分子.

Laplace 算符是一个高通滤波器,可起到平滑图像的作用^[19].采用 MAP 算法可以恢复出物质的高频信息,另外通过调整代价函数中正则项的权重有效抑制光学旁瓣.图 5(a)是采用 MAP 算法直接得到的点扩散函数,图 5(b)是对原始超分辨图像切趾得到的点扩散函数,图中点划线、实线和虚线分别对应正则参数 γ 取值 0 、 σ^2 和 $10\sigma^2$ 时的光强分布.图 5(a)中点扩散函数一级旁瓣的幅值分别为 -0.151 、 -0.102 和 -0.054 ,点扩散函数的半高全宽分别为 60 nm、62 nm 和 75 nm.对比可知,选择较大的正则参数可以更好地抑制光学旁瓣,不过图像的分辨率也会随之降低.在参数选择上需要平衡光学旁瓣和成像分辨率之间的关系, $\gamma = \sigma^2$ 是一

个合理的选择.

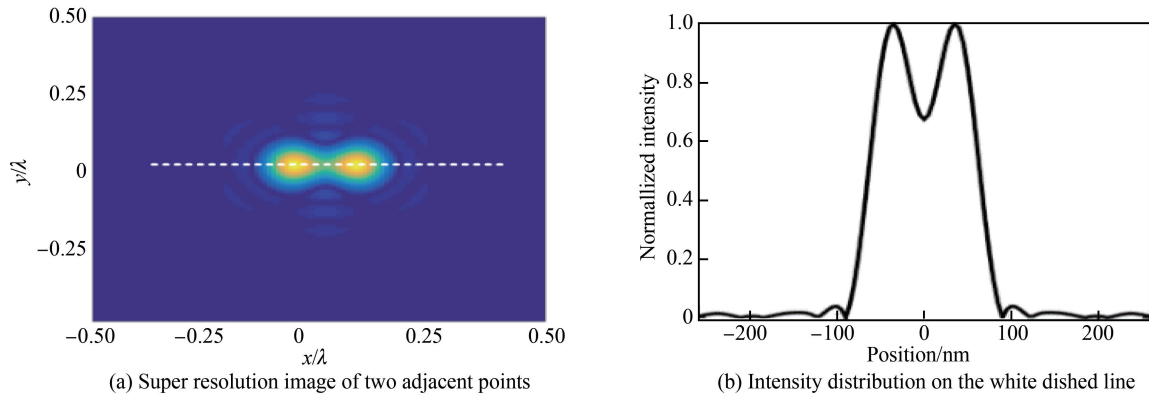


图 4 瑞利判据下的超分辨成像结果

Fig.4 Superresolution imaging performance under the Rayleigh criterion

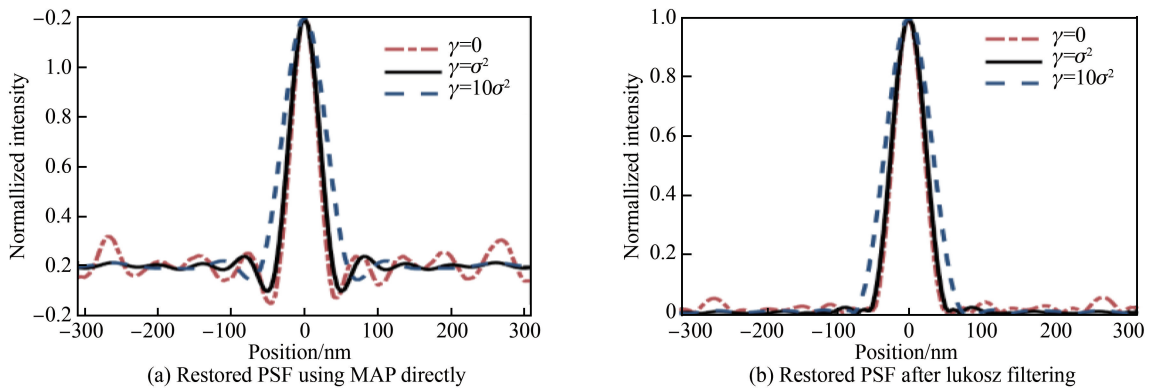


图 5 正则参数对成像结果的影响

Fig.5 Influence of the regularization parameter

3 结论

研究了金属纳米阵列在结构照明技术中的应用,详细分析了表面等离子体结构照明技术的原理和实现方案.针对表面等离子体结构照明技术面临光学旁瓣问题,提出采用基于 MAP 评估的图像恢复算法解决复杂模式干涉下超分辨图像恢复问题.研究表明:1)基于 MAP 评估的图像恢复算法可以在复杂模式干涉下恢复得到物质的高频信息;2)通过合理选择优化参数,可以有效抑制光学旁瓣,在参数选择上需要平衡光学旁瓣和成像分辨率之间的关系, $\gamma = \sigma^2$ 是一个合理的选择;3)PSIM 在波长 520 nm,数值孔径 1.3 下,可以得到半高全宽 65 nm 的各向均匀的超分辨图像,成像分辨率约为传统荧光显微镜的 3.6 倍.开展对表面等离子体结构照明技术的实验工作,验证 MAP 评估图像恢复算法的优越性是接下来的工作内容.该技术在生命科学研究上具有潜在应用价值.

参考文献

- [1] ABBE E. Beiträge zur theorie des mikroskops und der mikroskopischen wahrnehmung[J]. *Archiv FÜR Mikroskopische Anatomie*, 1873, **9**(1): 413-418.
- [2] GUSTAFSSON M G L. Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy [J]. *Journal of Microscopy*, 2000, **198**(2): 82-87.
- [3] HEINTZMANN R, CREMER C. Laterally modulated excitation microscopy: improvement of resolution by using a diffraction grating[C]. SPIE. 1999, **3568**(185): 15.
- [4] FROHN J T, KNAPP H F, STEMMER A. True optical resolution beyond the Rayleigh limit achieved by standing wave illumination[J].*Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, **97**(13): 7232-7236.
- [5] HEINTZMANN R, JOVIN T M, CREMER C. Saturated patterned excitation microscopy—a concept for optical resolutionimprovement[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, **19**(8): 1599-1609.
- [6] SCHERMELLEH L, CARLTON P M, HAASE S, et al. Subdiffraction multicolor imaging of the nuclear periphery with 3D structured illumination microscopy[J]. *Science*, 2008, **320**(5881): 1332-1336.

- [7] KNER P, CHHUN B B, GRIFFIS E R, *et al.* Super-resolution video microscopy of live cells by structured illumination [J]. *Nature Methods*, 2009, **6**(5): 339-342.
- [8] WEI F, LIU Z. Plasmonic structured illumination microscopy[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(7): 2531-2536.
- [9] CAO S, WANG T, XU W, *et al.* Gradient permittivity meta-structure model for wide-field super-resolution imaging with a sub-45 nm resolution[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6.
- [10] PONSETTO J L, WEI F, LIU Z. Localized plasmon assisted structured illumination microscopy for wide-field high-speed dispersion-independent super resolution imaging[J]. *Nanoscale*, 2014, **6**(11): 5807-5812.
- [11] CAO S, Wang T, SUN Q, *et al.* Meta-nanocavity model for dynamic super-resolution fluorescent imaging based on the plasmonic structure illumination microscopy method[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(4): 3863-3874.
- [12] LAI A, SHAN C, XI P. Structured illumination microscopy image reconstruction algorithm [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, **22**(4): 50-63.
- [13] LI D, SHAO L, CHEN B C, *et al.* Extended-resolution structured illumination imaging of endocytic and cytoskeletal dynamics[J]. *Science*, 2015, **349**(6251): aab3500.
- [14] WEN G, LI S, YANG X, *et al.* Super-resolution fluorescence microscopy system by structured light illumination based on laser interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(3): 25-35.
文刚,李思昆,杨西斌,等. 基于激光干涉的结构光照明超分辨荧光显微镜系统[J]. *光学学报*, 2017, **37**(3): 25-35.
- [15] CHANG B J, CHOU L J, CHANG Y C, *et al.* Isotropic image in structured illumination microscopy patterned with a spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(17): 14710-14721.
- [16] BRONGERSMA M L, KIK P G. Surface plasmon nanophotonics[M]. Springer, 2007.
- [17] SONG C, HAO P, YU M, *et al.* Enhancing electric field with gold subwavelength slits and nanowires[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 0116001.
宋超,郝鹏,余慕欣,等. 金纳米线与亚波长狭缝结合实现局域场增强研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(1): 0116001.
- [18] FANG N, LEE H, SUN C, *et al.* Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. *Science*, 2005, **308**(5721): 534-537.
- [19] MILANFAR P. Super-resolution imaging[M]. CRC press, 2010.
- [20] FRANÇOIS O, EDUARDO S, VINCENT L, *et al.* Bayesian estimation for optimized structured illumination microscopy[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, **21**(2): 601-614.
- [21] TOMAS L, PAVELKR Z, ZDENEK S, *et al.* Three-dimensional super-resolution structured illumination microscopy with maximum a posteriori probability image estimation[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(24): 29805-29817.
- [22] YOSHIKAWA H, ADACHI S. Optical constants of ZnO[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1997, **36**(10R): 6237.
- [23] JOHNSON P B, CHRISTY R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, **6**(12): 4370.
- [24] LI L. New formulation of the Fourier modal method for crossed surface-relief gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, **14**(10): 2758-2767.
- [25] WHITE J S, VERONIS G, YU Z, *et al.* Extraordinary optical absorption through subwavelength slits[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(5): 686-688.
- [26] WRIGHT S J, NOCEDAL J. Numerical optimization[M]. Springer Science, 1999, **35**(67-68): 7.
- [27] RAINER H, PIER A. B. High-resolution reconstruction in fluorescence microscopy with patterned excitation [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(20): 5037-5045.