

水下目标不同偏振特性对成像系统分辨率的影响

韩捷飞 夏 珉* 孙立颖 杨克成

华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

摘要 为研究具备不同偏振特性的目标对水下主动偏振成像系统分辨率的影响,设计了一套基于LED辅助照明的偏振成像实验系统。该系统在LED光源和成像设备前加入高偏振消光比的偏振光学元件,并使用两种不同表面偏振特性的目标,实现对水下环境的成像系统的特征图像获取。再利用倾斜刃边法处理实验图像,提取调制传递函数(MTF)。通过比较不同实验环境下,正交偏振成像和偏振差分成像的MTF值,得出偏振技术有助于抑制水下主动成像系统的前向散射光,提高系统整体分辨率的结论。针对不同性质的目标,应使用恰当的处理方式来获得高分辨率的图像。同时,该结论对线偏振和圆偏振照明条件皆适用。

关键词 成像系统; 偏振成像; 分辨率; 调制传递函数; 水下成像

中图分类号 TN209 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0311001

Influence of Underwater Targets with Different Polarization Properties on the Resolution of Imaging System

Han Jiefei Xia Min Sun Liying Yang Kecheng

School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract In order to study the influence of targets with various polarization properties on resolution of active polarization imaging system, an experimental polarization imaging system with LED source is designed. The optical elements with high polarization extinction ratio are placed before the LED source and imaging devices. Two targets with different surface polarization properties are applied in the system. The image of imaging system for underwater environment is obtained. The experimental images are processed with inclined edge method and the modulation transfer function (MTF) is extracted. Comparing MTF results in various experimental environments using orthogonal imaging and polarization difference imaging, the conclusion is obtained that polarization technique is beneficial to suppress the forward scattered light and enhance resolution of the system. For different targets, the proper processes are applied to obtain high resolution images. Meanwhile, the conclusion is appropriate for both of linear and circular polarization illuminations.

Key words imaging systems; polarimetric imaging; resolution; modulation transfer function; underwater imaging

OCIS codes 110.5405; 010.7295; 110.4100

1 引言

水下主动成像系统的成像质量受到水的散射特性的严重制约。水的后向散射光不包含目标信息,严重降低了图像的对比度;前向散射光模糊目标的细节,降低图像的分辨率^[1]。偏振成像技术作为传统光强成像的有益补充,已广泛应用于生物医学成像^[2]和水下成像^[3]中。近年来,国内外多个小组在这方面的研究中取得了突

收稿日期: 2015-09-11; 收到修改稿日期: 2015-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(41276042,61008050)

作者简介: 韩捷飞(1986—),男,博士研究生,主要从事水下成像方面的研究。E-mail: athrun.han@gmail.com

导师简介: 杨克成(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光电子技术和激光技术方面的研究。

E-mail: kcyang@hust.edu.cn

*通信联系人。E-mail: hadren@gmail.com

破性的进展,证明了线偏振和圆偏振照明在浑浊介质中检偏成像具备提高对比度的能力^[4-5];根据不同目标的表面特性采用偏振差分等方法进一步提高目标探测概率^[6-7],并且可以与距离选通系统^[8-9]、相关技术^[10-11]等结合提高水下目标探测能力。

然而,国内外的多数研究集中于偏振技术对图像对比度的提高,极少有研究者对水下成像系统的分辨率进行研究^[12]。在成像过程中,对比度只反映目标的轮廓信息,掌握该信息满足目标探测的应用,但为进一步掌握目标的纹理、边缘形态、表面特征等细节,就需要成像系统具备足够的分辨率来识别目标。因此,提高成像系统的分辨率在水下成像应用中具有十分重要的意义。根据Tyo^[13]的理论分析和实验验证^[14],偏振差分(PD)算法比偏振求和(PS)算法能获得更窄的点扩展函数(PSF),这为利用调制传递函数(MTF)评价水下主动偏振成像系统的分辨率特性提供了初步的理论和实验依据。偏振技术是否在提高对比度的同时抑制前向散射,进而提高分辨率是本文研究的重点。

由于现有的水下成像模型^[15-16]加入偏振参量来研究分辨率特性极其复杂,所以本文采用实验的方式,依据传统的水下成像系统结构,搭建了一套主动偏振成像实验系统。通过两种不同偏振特性的目标对该技术抑制前向散射的能力进行评估。利用MTF对最终的成像结果进行分辨率评价。同时在不同的偏振照明特性和水体散射环境下进行多组实验,通过比较实验结果,总结了主动偏振技术在水下成像中的分辨率的变化规律。

2 实验系统

物体的表面具有不同的偏振特性,如塑料、石块等退偏作用较强,金属、光滑表面物体等退偏作用较弱。在水下成像中,利用偏振检测技术可以有效提高物体与背景之间的对比度,提高目标识别的概率。然而为了进一步掌握水下目标细节、纹理、图案等信息,需要提高成像系统的分辨率,提高显示目标细节信息的能力。为了实验研究偏振技术能否提高水下成像系统对不同表面偏振特性的目标的分辨能力,搭建了一套水下主动偏振成像实验系统,并设计了两种退偏作用差异较大的目标作为研究对象。为了从目标图像中提取能够反映系统分辨率特征参数—MTF,对倾斜刃边法加以改进并利用,对所得偏振图像进行MTF提取。通过对不同偏振条件下的MTF曲线的比较,分析不同偏振检测方式是否有助于改善水下成像系统对目标的分辨率特性。除此之外,在研究线偏振照明影响基础上,引入圆偏振照明,验证圆偏振是否具有与线偏振相同的规律。

2.1 实验系统结构

主动偏振成像实验系统的结构框图如图1(a)所示。实验系统由4部分组成,即光学照明系统、成像系统、实验水槽和目标板。已搭建的真实实验系统如图1(b)所示。

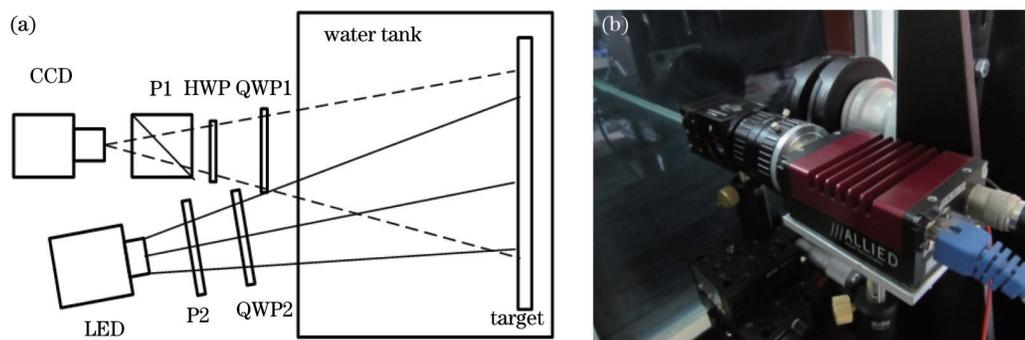


图1 (a) 主动偏振成像实验系统框图; (b) 真实实验系统

Fig.1 (a) Block diagram of active polarization imaging system; (b) actual experimental system

照明光源为CREE公司的XPE大功率绿光LED,并自制组成LED阵列,总功率为20 W,中心波长为535 nm,其光源光谱能量曲线如图2所示。利用反光碗控制LED发散角为15°,使得在水槽最远处时光斑可以覆盖整个目标。在LED前放偏振消光比为1000:1的线偏振片[图1(a)中P2]作为起偏器,该偏振片直径为50.8 mm。在起偏器前放置四分之一波片[图1(a)中QWP2]用来产生圆偏振光。

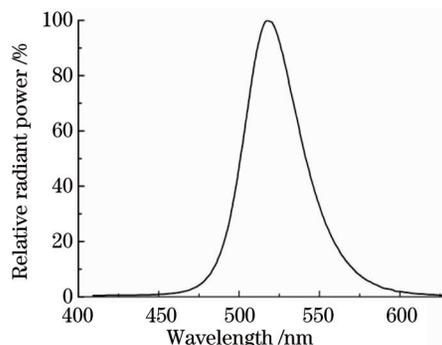


图2 XPE绿光LED光谱能量曲线

Fig.2 Spectral energy curve of the XPE green LED

成像系统中,主要成像器件为AVT公司的高分辨率CCD(Prosilica GT2300,分辨率为2336 pixel×1752 pixel),配以普密斯公司的焦距为50 mm定焦成像镜头(PMS-50XC10M),成像系统最大分辨率保证在120 lp/mm左右^[17]。在镜头前放置一偏振分光镜[PBS,Thorlabs CM1-PBS251,图1(a)中的P1]作为检偏器。实验中检偏器未使用线偏振片,因为线偏振片在旋转时会使采集到的图像发生位移和形变,同时降低有用光信息的透射率,不利于进行弱光检测。然而PBS通常不可旋转,为了实现对多个偏振状态的检测,在PBS前加入了半波片[Thorlabs Wph10M-532,图1(a)中的HWP],对进入PBS前的线偏振光方向进行旋转。通过适当地调节角度可以实现对所有线偏振态信号的检测。当需要进行圆偏振实验时,在HWP前放置四分之一波片[图1(a)中QWP1]。

实验用水槽尺寸为3 m×0.5 m×0.5 m,装入约480 L自来水,衰减系数约为 0.2 m^{-1} 。使用氢氧化镁颗粒作为散射颗粒^[12],调节实验用水的衰减系数。为了精确测量实验水体的衰减系数,先在50 mL试管中加入定量的氢氧化镁的颗粒,利用分光光度计测量已配好溶液在532 nm波长条件下的衰减系数,再按照比例在实验用水中加入等比例重量的氢氧化镁颗粒,确保实验用水的衰减系数偏差不大。

实验使用两种不同表面偏振特性的目标:1)退偏振作用较强的漫反射目标,该目标为40 cm×40 cm聚四氟乙烯板,板的一面用黑色PVC材料组成倾斜的未知角度的“L”型标记,如图3(a)所示。2)具有一定保偏特性的高反射率目标板,该目标为40 cm×30 cm有机玻璃板,在上面压制一层高反射膜,在膜的内侧印上黑白相间的条纹,如图3(b)所示。这两种目标有足够多的黑白边缘信息,方便选择计算区域。两个目标板在空气中测量了反射光的偏振特性,如图4所示。对目标1统称为低偏振度(DOP)目标,对目标2统称为高DOP目标。

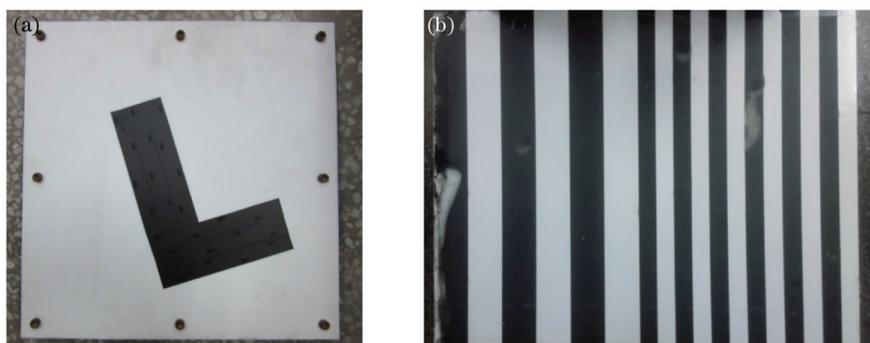


图3 (a) L型低偏振度目标板; (b) 条纹型高反射率目标板

Fig.3 (a) L type target with low degree of polarization; (b) stripes type target with high reflectivity

在水体衰减系数和目标位置确定后,对两种目标在典型的线偏振夹角的情况下获取图像,然后再分别插入四分之一波片,对圆偏振照明条件进行实验。在所有实验完成后,改变目标位置以及水体性质,保证在同一测试条件下,只有检偏器发生变化,确保实验的准确性。

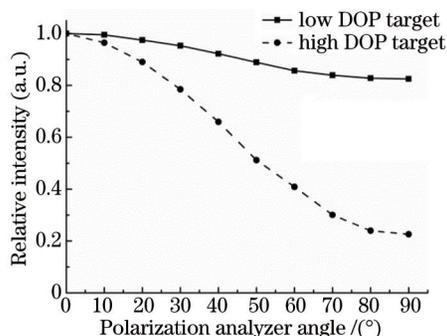


图4 两种目标反射光偏振分布特性

Fig.4 Polarization distribution of the reflections by two targets

2.2 MTF 计算方法

水下成像系统可以看作线性空间不变系统,假设目标图像作为系统的输入信号 $f(x,y)$,系统输出图像为 $g(x,y)$,则有

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y), \quad (1)$$

式中 $h(x,y)$ 为成像系统对点光源的响应,即点扩展函数(PSF),“*”表示卷积。将(1)式进行傅里叶变换,即可得到空间频率域的表达式为

$$G(u,v) = F(u,v)H(u,v), \quad (2)$$

式中 u 和 v 为空间频率,分别对应于空间域的 x 和 y , G 、 F 、 H 为 g 、 f 、 h 的傅里叶变换。系统频率域的响应 $H(u,v)$ 即是光学传递函数(OTF),OTF的模即为MTF,表征了系统在不同空间频率下的对比度响应。然而,针对水下成像系统,光子传输过程中还要受到水体散射的影响,导致最终的结果发生变化,相当于改变了系统响应 $H(u,v)$ 。因此,水下成像过程中的系统响应 $H(u,v)$ 可以分成两部分,成像系统本身的响应以及散射介质的响应。其表达式为

$$H(u,v) = H_{\text{system}}(u,v)H_{\text{medium}}(u,v), \quad (3)$$

H_{system} 和 H_{medium} 共同对原始图像 $F(u,v)$ 产生作用。然而,成像系统自身的响应函数可以通过实验来测定,而水体的响应函数目前从理论上只有近似解,现有的实验测定方法需要精确的实验系统结构设计。根据2.1节的实验系统设计可知,实验时只有起偏器和检偏器发生变化,系统的照明光场和接收系统空间光学特性没有任何变化。因此,可以认为系统自身的响应 H_{system} 不变,而水体的响应 H_{medium} 根据水质和偏振照明特性而变化。可以通过计算整个成像过程中的响应 $H(u,v)$ 来表征水体对不同偏振态照明条件下的响应,从而获得在该条件下系统的分辨率特性。

当采用偏振光源进行照明时,由于目标和水的退偏振作用,旋转检偏器使系统获得与检偏器偏振方向相同的偏振强度图像。换句话说,成像系统、目标以及散射介质,对偏振光源在每一种偏振态都有一种输出结果,即都有一种响应。当接收系统前不使用检偏器时,CCD接收到的最终图像包含有成像过程中所有偏振态的响应。当使用检偏器时,CCD接收的图像只包含单一偏振态的响应。因此通过特殊算法对CCD接收到的最终偏振强度图像进行处理,就可以获得对应偏振态的系统响应,从而获得MTF来分析系统在该条件下的分辨率特性。

为了从实验图像中提取MTF信息,使用在遥感成像^[18-19]中广泛使用的ISO 12233标准^[20]的倾斜刃边法对图像进行处理,其基本过程如图5所示。假设像素间隔为 d ,从最终图像中选取含有黑白边缘的局部区域。利用梯度算子确定边缘的倾斜角度 θ ,将图像的灰度信息利用光电转换函数转化为光强信息,并将其投影到垂直于边缘的直线上。在该直线上按照 $d\sin\theta/4$ 的间隔划分坐标,并将投影的数据按照位置放入对应的坐标间隔中,再对同一坐标间隔内的强度数据取平均值。对该数据进行滤波^[21]后,得到过采样的边缘扩展函数(ESF)。将ESF求微分获得线扩展函数(LSF)。对LSF做傅里叶变换并归一化后即得MTF,如图5所示。

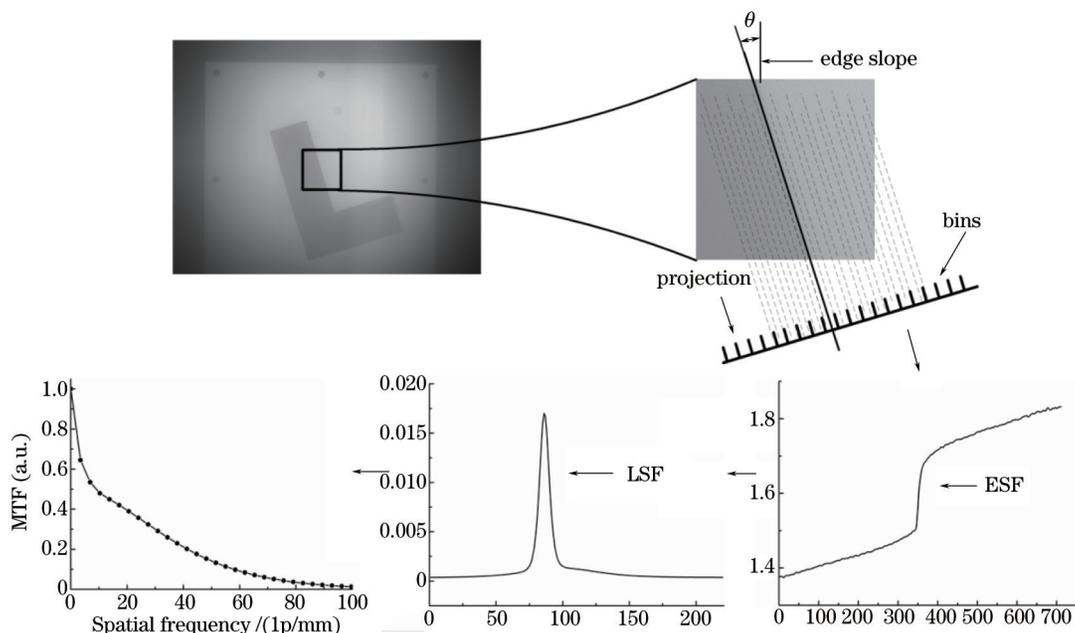


图 5 MTF 提取流程示意图

Fig.5 Procedure schematic of extracting MTF

为了保证所得 MTF 结果准确而可靠,对上述部分步骤进行说明和改进:1) 该实验为双程光路,即目标具备反射特性,这一特征可类比遥感成像的原理。2) 两种目标中的边缘的倾斜角度任意设定,并不影响最终的实验结果。3) 该方法对误差敏感,光斑和后向散射的强度分布不均会造成 MTF 曲线的严重低估^[22]。为了降低这种负面影响,在选取计算的边缘区域时,选择极小的一块区域进行计算,保证在计算区域内为均匀强度分布。4) 为了保证后期图像处理结果具备可比性,在同一实验条件下所选取的计算区域的位置,在偏振检测时所获得图像的位置不变。

3 实验结果及讨论

3.1 正交偏振成像

在主动偏振成像中,通常使用正交成像的方式来获得高对比的图像。为了检验该成像方式针对成像分辨率的有效性,将两种目标的典型角度的图像做处理并加以比较,结果如图 6(a)、(b)所示。

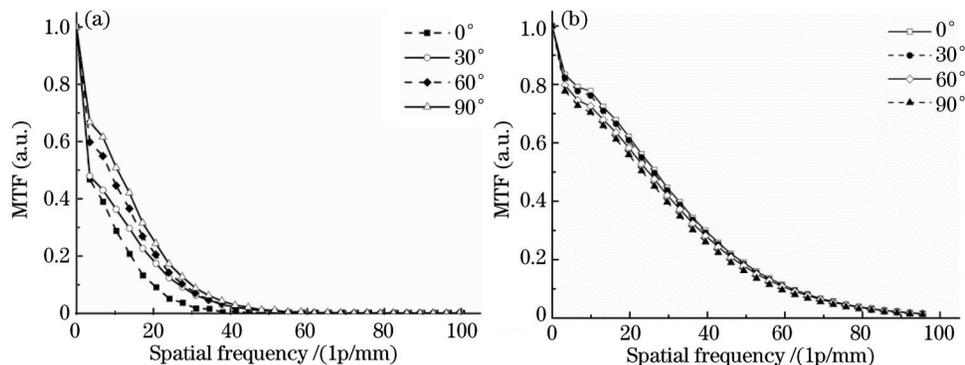


图 6 不同偏振夹角 MTF 结果。(a) 低 DOP 目标,光学厚度 2.1; (b) 高 DOP 目标,光学厚度 1.32

Fig.6 MTF results of various polarization angles. (a) Low DOP target, optical thickness is 2.1;

(b) high DOP target, optical thickness is 1.32

其中,图 6(a)中目标成像距离 3 m,水体衰减系数 0.73 m^{-1} ,图 6(b)中目标成像距离 1.5 m,衰减系数 0.88 m^{-1} 。比较看出,低 DOP 的目标 MTF 曲线随着角度的增加而上升,直至正交成像时达到最高,而高 DOP 目标的结果恰好相反。这是因为成像系统接收到的光子是与其偏振检测方向相同的光子。而这部分光子,

是由两部分组成:1)由目标反射没有经历任何前向散射的弹道光子,这一部分光子是有用信息;2)目标反射后退偏到随机方向,再经过水的散射又退偏回该方向的光子,这部分光子构成了前向散射噪声。而根据图6(a)、(b)可以推测,两种目标反射出的光子偏振态分布会存在较大差异。当正交检测时,低DOP目标有足够多的弹道光子构成目标信息,而经历过散射的光子数量较少。高DOP目标恰恰相反,弹道光子较少,而其他偏振方向的光子有足够多的数量退偏而被CCD接收,成为散射噪声。这一机制可以类比信噪比的评价方式^[23]。因此,就会出现两种目标MTF曲线变化规律相反的现象。该现象可以通过图7实验图像作直观的理解。图7为图6结果中对应的典型图像,其中图7(a),(b)为低DOP目标,偏振夹角分别为0°、90°;图7(c),(d)为高DOP目标,偏振夹角分别为0°、90°。图7(a)、(c)虽然亮度较高,但是图7(a)相对于图7(b)较模糊,而图7(c)相对于图7(d)较清晰。实际上图7(c)、(d)的清晰度差别较小,这一点从图6(b)中已经说明。

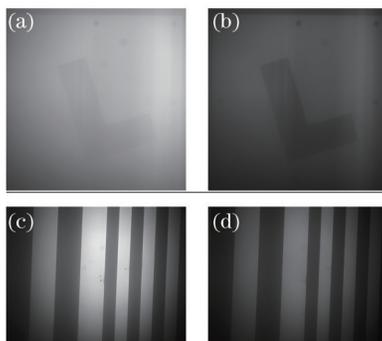


图7 图6结果中对应的典型图像。(a)低DOP目标,0°;(b)低DOP目标,90°;(c)高DOP目标,0°;(d)高DOP目标,90°

Fig.7 Typical images under the same condition as Fig. 6. (a) Low DOP target, 0°; (b) low DOP target, 90°; (c) high DOP target, 0°; (d) high DOP target, 90°

在其他环境中该结论同样得到了验证,如图8所示。其中图8(a)目标成像距离2.5 m,衰减系数 0.73 m^{-1} ,光学厚度1.8;图8(b)中目标成像距离1.6 m,衰减系数 1.37 m^{-1} ,光学厚度2.1。将图6和图8综合比较,在光学厚度降低时,MTF的提升的幅度在低DOP目标情况下得到减弱,在高DOP目标情况下得以增大。此时,前者在任何偏振态下都有足够多的弹道光子,而散射作用被削弱;后者尽管散射作用同样被削弱,多数光子维持原先的偏振态,目标退偏的光子少到与噪声水平相差不大,因此MTF不同角度之间的差异增大。可见,偏振技术在目标能见度范围内,在一定散射条件下都存在影响分辨率的作用,只是不同表面偏振特性目标的规律不同。但是当目标足够清晰时,即光学厚度较小的时候,使用偏振技术提高成像质量意义不大。

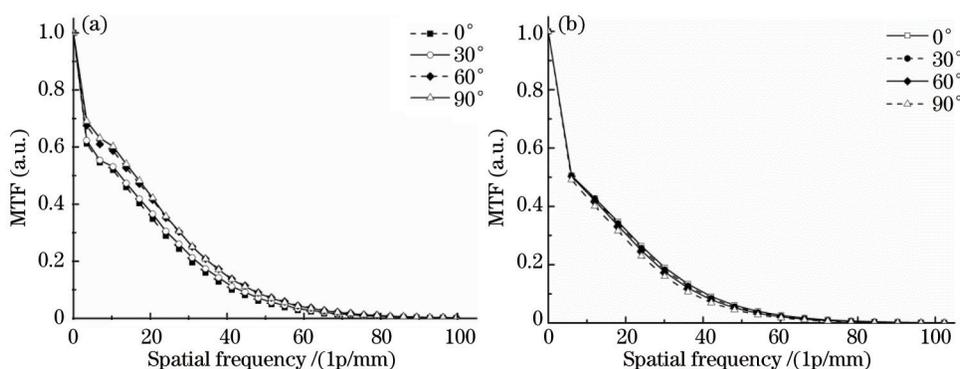


图8 不同偏振夹角MTF结果。(a)低DOP目标,光学厚度1.8;(b)高DOP目标,光学厚度2.1

Fig.8 MTF results of various polarization angles. (a) Low DOP target, optical thickness is 1.8;

(b) high DOP target, optical thickness is 2.1

3.2 偏振差分成像

图6和图8的比较结果,说明对于低DOP目标正交偏振已经获得最佳的效果,而对于高DOP目标并没有获得改进。为了提高分辨率,可以使用PD和PS方法来处理实验图像。根据3.1节实验可知,实验结果中0°和90°的图像为一对正交的偏振分量,PD方法是令两者强度分布按照空间对应位置相减,PS方法是两者强

度分布相加。通过PS和PD方法获得的图像强度分布 I_{PS} 和 I_{PD} 其表达式为

$$I_{PS}(x,y) = I_0(x,y) + I_{90}(x,y), \quad (4)$$

$$I_{PD}(x,y) = I_0(x,y) - I_{90}(x,y), \quad (5)$$

式中 I_0 和 I_{90} 为检偏和起偏夹角分别为 0° 和 90° 时的图像强度分布。从(5)式可以看出, I_{PS} 等效于传统的强度成像方式, 即成像系统没有检偏器时接收到的图像。则高 DOP 目标的图像处理后, 再提取 MTF 得到如图 9 所示结果。

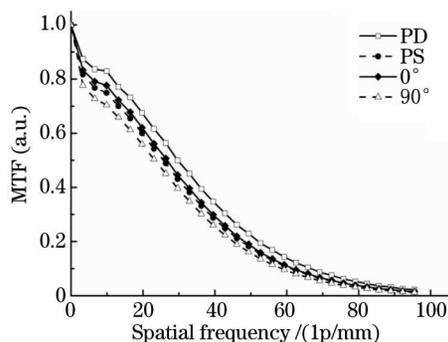


图 9 传统偏振成像和利用 PD 和 PS 算法处理后的 MTF 结果比较

Fig.9 Comparison of MTF results between conventional polarization images and images processed by PD and PS methods

可以看出 PD 运算获得了最高的 MTF 曲线, 而 PS 运算得到的结果介于传统成像方式之间。PD 的运算将两种系统响应的 PSF 做减法运算, 获得了更窄的 PSF, 而 PS 运算等效于传统强度成像, 即两个正交分量的强度叠加。这一结论与 Tyo^[13-14] 的理论和实验相吻合。处理后的图像如图 10 所示。相比图 7(c) 和 (d), 图 10(a) 从对比度和清晰度都有一定的优势, 并且人眼观察更舒适。而图 10(b) 在局部出现饱和现象, 相对图 10(a) 来说清晰度稍差, 不利于人眼观察。

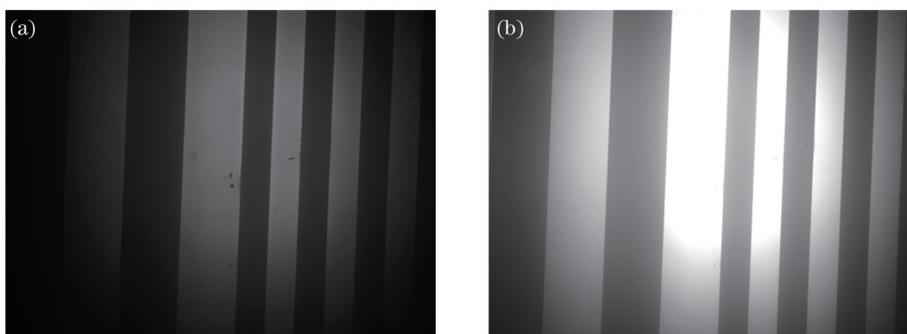


图 10 利用 PD 和 PS 算法处理后的图像。(a) PD 方法; (b) PS 方法

Fig.10 Images processed by PD and PS methods. (a) PD method; (b) PS method

PD 算法通常用两幅正交图像做减法, 在此基础上, 尝试将平行偏振态结果与其他偏振态结果相减, 提取 MTF 进行比较, 结果如图 11 所示。其中 PD 代表差分处理, 数字代表平行偏振态图像与检偏夹角为对应数字的图像

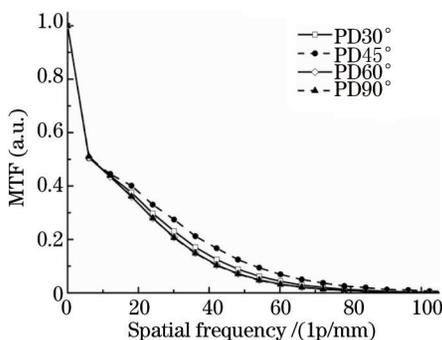


图 11 非正交偏振差分处理后的结果

Fig.11 Results of nonorthogonal polarization difference processing

相减。由图 11 可知,PD60°与PD90°两个状态的结果基本重合,而且效果最差。换句话说,正交态减法不一定会获得最优的结果,需要对相减后图像的 PSF 进行具体评估才能确定,在本文中不作讨论。然而,MTF 用于评价分辨率是可取的,评价结果是否适于人眼观察,并不能用一个参量评价。在实际使用中,正交偏振态差分最容易实现,能够兼顾对比度和分辨率,因此常被其他系统使用。

3.3 圆偏振成像

圆偏振的实验结果如图 12 所示。其中,图 12(a)中目标成像距离 2.5 m,水体衰减系数 0.88 m^{-1} ,图 12(b)中目标成像距离 2 m,衰减系数 0.88 m^{-1} 。圆偏振只有两种检测状态,C_p代表圆偏振平行偏振态检测,即光源与接收系统的检测方向相同,C_o代表正交偏振态检测,即光源与接收的检测方向正交。图 12(a)中,低 DOP 目标在正交检测时有更优的 MTF 曲线,而对于高 DOP 目标[图 12(b)],平行偏振态检测的 MTF 曲线仍然高于正交偏振态检测。此时,利用 PD 算法能够获得最优的分辨能力。可见,线偏振照明条件下的分辨率变化规律同样适用于圆偏振照明条件。

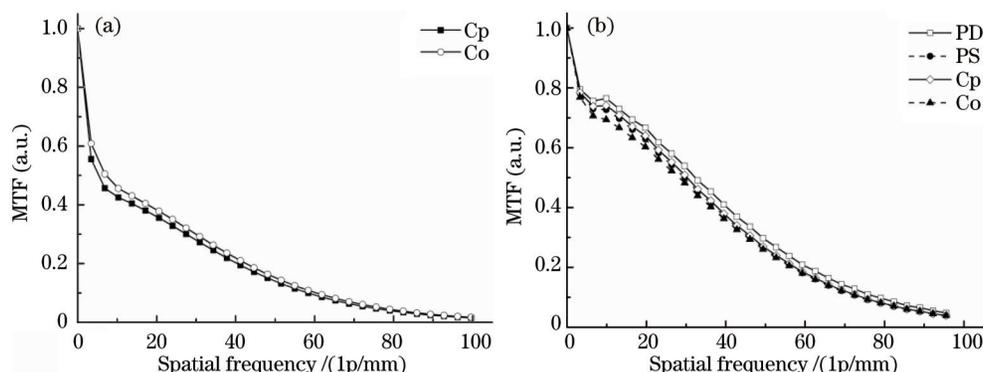


图 12 圆偏振实验结果。(a) 低 DOP 目标,光学厚度 2.2; (b) 高 DOP 目标,光学厚度 1.76
Fig.12 Experimental results under circular polarization. (a) Low DOP target, optical thickness is 2.2;
(b) high DOP target, optical thickness is 1.76

4 结 论

对两种不同表面偏振特性的目标进行实验,利用倾斜刃边法提取图像中的 MTF 来检验整个成像过程的分辨率特性。通过实验结果比较,得出对退偏振较强的目标成像条件下,正交偏振成像能提高分辨率,而对于退偏振较弱的目标,PD 方式能提高分辨率。尽管对于 PD 算法正交偏振态差分检测不是最优结果,但是足以满足实际工程应用的需求,具备提高成像质量的能力。以上结论对圆偏振和线偏振照明条件都适用。研究结果均在中心波长 535 nm 照明条件下获得,由于不同波长的照明光在不同水质条件下的散射状态不同,所以,该结论是否适用于其他波长还需要理论和实验的进一步分析,本文研究为水下成像系统的分辨率研究提供了一种准确而高效的实验方法。为了进一步完善对该系统的分析,将尝试建立 Monte Carlo 模型^[24]来具体分析这一现象。

参 考 文 献

- 1 B L McGlamery. Computer analysis and simulation of underwater camera system performance[J]. Sio Ref, 1975, 75: 2.
- 2 S G Demos, R R Alfano. Optical polarization imaging[J]. Appl Opt, 1997, 36(1): 150-155.
- 3 T Treibitz, Y Y Schechner. Active polarization descattering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(3): 385-399.
- 4 S A Kartazayeva, X Ni, R R Alfano. Backscattering target detection in a turbid medium by use of circularly and linearly polarized light [J]. Opt Lett, 2005, 30(10): 1168-1170.
- 5 Cao Nianwen, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.*. The circular polarization image and the calculation for the farthest imaging range for underwater object[J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(2): 150-154.
曹念文, 刘文清, 张玉钧, 等. 水下目标圆偏振成像及最远成像距离的计算[J]. 中国激光, 2000, 27(2): 150-154.
- 6 T Novikova, A B eni ere, F Goudail, *et al.*. Sources of possible artefacts in the contrast evaluation for the backscattering polarimetric images

- of different targets in turbid medium[J]. Opt Express, 2009, 17(26): 23851–23860.
- 7 H Shao, Y He, W Li, *et al.*. Polarization-degree imaging contrast in turbid media: A quantitative study[J]. Appl Opt, 2006, 45(18): 4491–4496.
- 8 J Guan, J Zhu. Target detection in turbid medium using polarization-based range-gated technology[J]. Opt Express, 2013, 21(12): 14152–14158.
- 9 Wang Bo, Wan Lei, Li Ye, *et al.*. Underwater laser image segmentatin method based on adaptive pulse coupled neural networks[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0410004.
王 博, 万 磊, 李 晔, 等. 基于自适应脉冲耦合神经网络的水下激光图像分割方法[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0410004.
- 10 H He, Y Guan, J Zhou. Image restoration through thin turbid layers by correlation with a known object[J]. Opt Express, 2013, 21(10): 12539–12545.
- 11 M Dubreuil, P Delrot, I Leonard, *et al.*. Exploring underwater target detection by imaging polarimetry and correlation techniques[J]. Appl Opt, 2013, 52(5): 997–1005.
- 12 B Cochenour, S O'Connor, L Mullen. Suppression of forward-scattered light using high-frequency intensity modulation[J]. Opt Eng, 2013, 53(5): 051406.
- 13 J S Tyo. Enhancement of the point-spread function for imaging in scattering media by use of polarization-difference imaging[J]. J Opt Soc Am A, 2000, 17(1): 1–10.
- 14 J S Tyo, M P Rowe, E N Pugh, *et al.*. Target detection in optically scattering media by polarization-difference imaging[J]. Appl Opt, 1996, 35(11): 1855–1870.
- 15 B L McGlamery. A computer model for underwater camera systems[C]. 1980, 208: 221–231.
- 16 J S Jaffe. Monte Carlo modeling of underwater-image formation: Vvalidity of the linear and small-angle approximations[J]. Appl Opt, 1995, 34(24): 5413–5421.
- 17 Li Guangle, Huang Wenyong, Liu Qingsong, *et al.*. Improved Zhang's calibration method and experiments for underwater binocular stereo-vision[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1215006.
李光乐, 黄文有, 刘青松, 等. 面向水下双目视觉的改进张氏标定方法及实验[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1215006.
- 18 Xu Weiwei, Zhang Liming, Yang Benyong, *et al.*. On-orbit MTF measurement of high resolution satellite optical camera using periodic targets[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0711001.
徐伟伟, 张黎明, 杨本永, 等. 基于周期靶标的高分辨光学卫星相机在轨 MTF 检测方法[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0711001.
- 19 Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun, *et al.*. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2891–2897.
李铁成, 陶小平, 冯华君, 等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2891–2897.
- 20 International Organization Standardization Photography-electronic still picture cameras-resolution and spatial frequency responses ISO 12233:2000(E)[S]. ISO Standard 12233, 2014.
- 21 Zhang Qiang, Liu Tingting, Li Haibin, *et al.*. Research on region matching for underwater images based on optimum searching area[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0615001.
张 强, 刘婷婷, 李海滨, 等. 基于最佳搜索域的水下图像区域匹配算法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0615001.
- 22 Zeng Xuefeng, Zhang Xuejun. Impact of mid-spatial frequency errors in optical manufacturing on modulation transfer function[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 072202.
曾雪锋, 张学军. 光学制造中频残差对光学调制传递函数的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 072202.
- 23 T Treibitz, Y Y Schechner. Resolution loss without imaging blur[J]. J Opt Soc Am A, 2012, 29(8): 1516–1528.
- 24 Xia Min, Yang Kecheng, Zheng Yi, *et al.*. Influence of wavy sea surface on airborne lidar underwater beam quality with Monte Carlo method [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(2): 178–182.
夏 珉, 杨克成, 郑 毅, 等. 用蒙特卡罗法研究波动水面对机载海洋激光雷达水下光束质量的影响[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 178–182.