

基于光学滤波的水面弱纹理提取方法研究

张祥翔^{1,2}, 傅雨田¹, 陈永和^{1*}

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 水下潜体运动产生的内波反映到水表会形成一定的红外弱纹理信号,这使得利用红外遥感手段探测成为可能。但是这种纹理信号的对比度很弱,而且往往和振幅很强的背景杂波混在一起,给信号的提取造成很大困难。比较了已有水面弱纹理探测方法的优缺点,提出光学滤波的方法增强水面弱纹理信号的信杂比,使这种信号的提取更容易。基于非相干光学滤波的原理和特定信杂比评估弱纹理信号提取性能的方法,对不同特定频率信号的光学滤波方法采用信杂比进行分析和评估,然后在此基础上,针对特定频率的信号优化了相应的非相干光学传递函数,通过仿真和实验验证了该方法的可行性,同时表明优化的双孔径非相干光系统对弱纹理模型和信号具有较好的提取能力,该优化的系统可以得到 7% 以上的信杂比增强,再结合后续的数字对比度增强技术可以进一步有效提高对弱纹理信号的提取能力。

关键词: 弱纹理; 信杂比增强; 非相干光; 光学滤波

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200215

Research on extracting water weak texture based on optical filtering

Zhang Xiangxiang^{1,2}, Fu Yutian¹, Chen Yonghe^{1*}

- (1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technology and Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The submarine movement underwater can produce special internal wave which will rise and arrive at the water surface and make up a kind of the special weak texture. The texture makes it possible to detect through infrared remote sensing device. But the texture signal usually has very low contrast and is always mixed with intensive clutter in the sea surface background. Therefore, it is very difficult to extract these special textures from all the captured information. After comparing the advantage and disadvantage in the state of art for the texture extraction, optical filtering based on incoherent light was used for enhancing Signal-Clutter-Ratio(SCR) of the weak texture on the water surface. That will make the extraction much easier. Based on the optical principle of interference filtering and SCR evaluation method for the ability of the device to extract the weak texture signal on the water surface, optical filtering method for signals with different frequency was analyzed and evaluated by SCR. The optical transfer function of interference light was optimized according to the target frequency of the weak-texture signals. The simulation and experiment were implemented for verifying the feasibility. The optimized double-aperture optical system has better ability to extract the weak texture, which has showed that 7% SCR enhancement can be derived for the weak texture model and signal from this system. Combined with the digital contrast method, the ability for extracting the weak texture from the sea surface can be further improved.

Key words: weak texture; signal-clutter-ratio enhancement; incoherence light; optical filtering

0 引言

水下潜体的运动产生的内波反映到水表会形成一定的红外弱纹理信号,使得红外探测成为可能^[1],研究表明,水下潜体运动产生的水面弱纹理信号主要有 V 型纹理、涡型纹理等,它们的特点是背景杂波强、振幅弱,呈现一定空间频率分布^[2-8]。目前所采用的光学探测手段主要是使用相机获取海面纹理图像,再利用数字滤波算法识别目标纹理^[9-12],所用相机一般为单孔径光瞳。由于这种纹理信号的振幅弱,对比度很低,往往和海浪等振幅很强的背景杂波混在一起,给信号的提取造成很大困难,尤其是随着潜体降噪、深潜技术的发展,这些纹理信号的探测难度更大。

根据这些研究基础,文中提出了一种基于非相干光学滤波提升水面弱纹理信号提取能力的方法。该方法针对水面弱纹理目标特性,采用特定的信杂比评价方式,在非相干光学滤波原理的基础上优化了适合特定频率信杂比增强的光学传递函数,提高了弱纹理信号相关分量在整个图像频谱中的占比,从理论和实验上验证了基于非相干光学滤波增强弱纹理信号信杂比的可行性。

1 弱纹理探测评价指标

弱纹理探测可以采用信杂比进行评价^[13]。目标信号是具有特定频率分布的弱纹理,其他频率分量则属于杂波,表示目标纹理的物理量 ζ_{signal} 除以表示杂波纹理的物理量 ζ_{clutter} ,用分贝 (dB) 表示,称之为信杂比 $\text{SCR}_{\text{texture}}$,如公式 (1) 所示:

$$\text{SCR}_{\text{texture}} = 10\lg\left(\frac{\zeta_{\text{signal}}}{\zeta_{\text{clutter}}}\right) \quad (1)$$

对图像直接进行分析时采用信号方差 σ_s^2 和杂波方差 σ_c^2 分别表示信号和杂波物理量,并用分贝

(dB) 表示信杂比 $\text{SCR}_{\text{texture}}$,如公式 (2) 所示:

$$\text{SCR}_{\text{texture}} = 10\lg\left(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_c^2}\right) \quad (2)$$

信杂比越高,说明信号越强,背景越弱,这样信号提取就更容易。提高信杂比,可以通过提高信号分量,也可以通过抑制杂波分量。

2 非相干光学滤波原理及最优选择

用光学遥感手段进行海面纹理探测是基于海面辐射的被动探测,属于非相干光探测。

非相干光探测中的光学滤波通过对非相干光学传递函数 (MTF) 进行调制,可以在一定程度上提取特定频率的信号。对衍射受限系统,非相干光学传递函数 $H(u,v)$ 就是光瞳函数 $P(\xi,\eta)$ 的自相关,所以衍射受限的非相干光学传递函数可以表示为^[14]:

$$H(u,v) = \frac{\iint_{-\infty}^{+\infty} P(\xi,\eta)P(\xi+\alpha')\lambda'(v+\beta')d\alpha'd\beta'}{\iint_{-\infty}^{+\infty} [P(\xi,\eta)]^2 d\xi d\eta} \quad (3)$$

普通单孔径系统,如图 1(a) 所示,其 MTF 用归一化频率表达如公式 (4) 所示,MTF 随归一化频率 γ 变大而减少,如图 1(b) 所示。

$$\text{MTF}_{\text{single}}(\gamma) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos\gamma - \gamma(1-\gamma^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (4)$$

根据公式 (1),具有特定频率 γ_{typical} 的目标纹理的物理量用 $\text{MTF}_{\text{single}}d\gamma$ 表示,其他频率分量为杂波,其物理量用 S_{single} 表示,所以单孔径系统的信杂比 $\text{SCR}_{\text{single}}$ 可以表示为:

$$\text{SCR}_{\text{single}} = 10\lg\frac{\text{MTF}_{\text{single}}d\gamma}{S_{\text{single}}} \quad (5)$$

根据非相干光学滤波原理,适当改变光瞳的形状,可以提高目标频率的相对占比,减少非目标频率

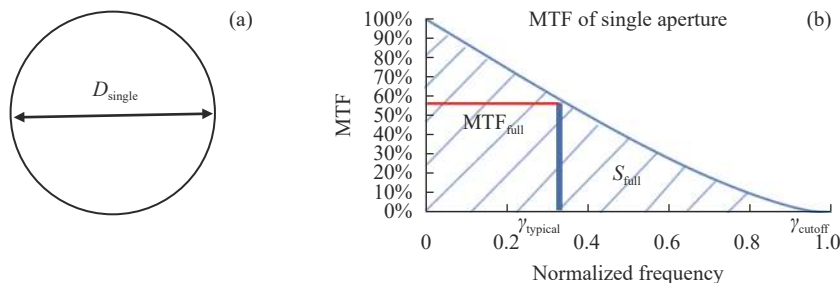


图 1 单孔径及其光学传递函数

Fig.1 Single-aperture and its MTF

分量,也就是杂波分量占比,从而提高信杂比。减少杂波分量,最理想的是使杂波分量对应的传递函数为 0,由于在非相干光系统中零频分量无法减少,所以主要考虑使其他非零频杂波分量尽量减少。

多孔径光瞳可以抑制部分非零频杂波分量,其 MTF 函数 $MTF_{\text{multi-aperture}}$ 为^[15]:

$$MTF_{\text{multi-aperture}} = MTF_d + \frac{1}{N} MTF_d * \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N \delta\left(\xi \pm \frac{x_j - x_k}{\lambda f}, \eta \pm \frac{y_j - y_k}{\lambda f}\right) \quad (6)$$

式中: MTF_d 为多孔径中每一个子孔径的 MTF; $x_j - x_k$ 和 $y_j - y_k$ 为子孔径的相对位置; N 为子孔径的数目,其中 $N \geq 2$ 。

由公式 (6) 可知,当 $N=2$ 时,即采用双孔径系统时,如图 2(a) 所示,选取合适的子孔径直径及其相对位置,在目标频率处可以得到最大 50% 的 MTF_m ,同时可使部分非零频杂波分量的传递函数为 0,如图 2(b) 所示。对应的双孔径系统非相干光学传递函数 MTF_{double} 如公式 (7) 所示:

$$MTF_{\text{double}} = MTF_d + \frac{1}{2} MTF_d \left(\xi + \frac{x_j - x_k}{\lambda f}\right) MTF_d \left(\xi - \frac{x_j - x_k}{\lambda f}\right) \quad (7)$$

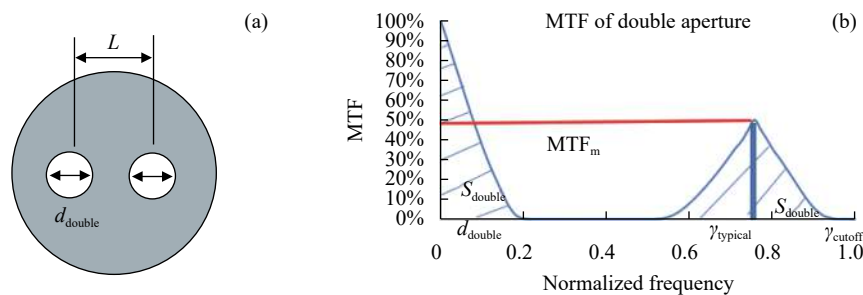


图 2 双孔径及其光学传递函数

Fig.2 Double-aperture and its MTF

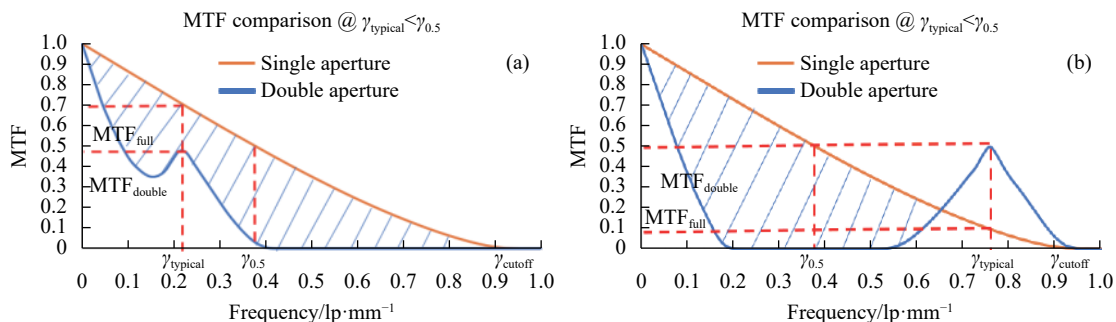


图 3 双孔径和单孔径光学传递函数比较

Fig.3 MTF comparison between double-aperture and single-aperture

根据公式 (1), 双孔径系统中目标频率的物理量可以用 $MTF_m d\gamma$ 表示, 杂波可以用 S_{double} 表示, 因此双孔径信杂比可以表示为:

$$SCR_{\text{double}} = 10 \lg \frac{0.5 d\gamma}{S_{\text{double}}} = 10 \lg \frac{0.5 d\gamma}{2 \left(\frac{d_{\text{double}}}{D_{\text{single}}}\right)^2 S_{\text{single}}} \quad (8)$$

式中: D_{single} 为单孔径直径; d_{double} 为双孔径中子孔径直径, 0.5 为双孔径的最大 MTF, 即 MTF_m 。

因此在目标频率 γ_{typical} 下双孔径系统相对于单孔径系统信杂比的增强比例 ΔS 为:

$$\Delta S = \frac{SCR_{\text{double}} - SCR_{\text{single}}}{|SCR_{\text{single}}|} = 10 \lg \frac{0.5}{2 \left(\frac{d_{\text{double}}}{D_{\text{single}}}\right)^2 MTF_{\text{single}}} / |SCR_{\text{single}}| \quad (9)$$

由于 $d_{\text{double}}/D_{\text{single}} \leq 0.5$, $MTF_{\text{single}} \leq 1$, 因此 $\Delta S > 0$, 也就是双孔径相对单孔径总有信杂比增强。图 3(a) 是双孔径对中低频信号的信杂比增强, 图 3(b) 是对中高频信号的信杂比增强, 阴影部分是双孔径可以抑制的杂波频率分量。 $\gamma_{0.5}$ 是 MTF 为 MTF_m 即 0.5 时的频率。

3 双孔径系统非相干光滤波仿真

根据以上分析,通过选取双孔径中子孔径的相对位置和大小,可以对特定频率的信号提高信杂比。基于该原理对理想模型进行仿真,然后对弱纹理模型进行验证。

3.1 双孔径系统参数选择

影响双孔径系统信杂比增强的因素有双孔径中子孔径直径和归一化频率。

如图 4(a) 所示,双孔径中归一化子孔径直径 ($d_{\text{double}}/D_{\text{single}}$) 越小,信杂比增强越大;如图 4(b) 所示,相对于截止频率的归一化频率 ($\gamma_{\text{typical}}/\gamma_{\text{cutoff}}$) 越高,信杂比增强越大。

遥感相机为了获得清晰的图像,通常希望系统的 MTF 能够达到 0.2 以上,这要求相机光学系统的 MTF

不低于 0.4。MTF 越高,所需要的口径越大。文中以目标 MTF 达到 0.4 所需要的口径作为单孔径系统的参数。

双孔径系统中双孔径的间距 L 由目标频率 γ_{typical} 决定,如公式 (10) 所示:

$$\gamma_{\text{typical}} = \frac{d_{\text{double}}}{L + d_{\text{double}}} \frac{L}{\lambda F} \quad (10)$$

式中: F 为镜头焦距; λ 为系统波长; d_{double} 为双孔径中子孔径直径。

子孔径直径的选取决定杂波抑制程度和积分时间。子孔径直径越小对杂波的抑制越有效,但所需的积分时间越长,图像的噪声越大;子孔径直径越大,杂波抑制程度越低,信杂比增强越少。综合考虑两方面因素,选取子孔径直径为单孔径直径的 0.25。

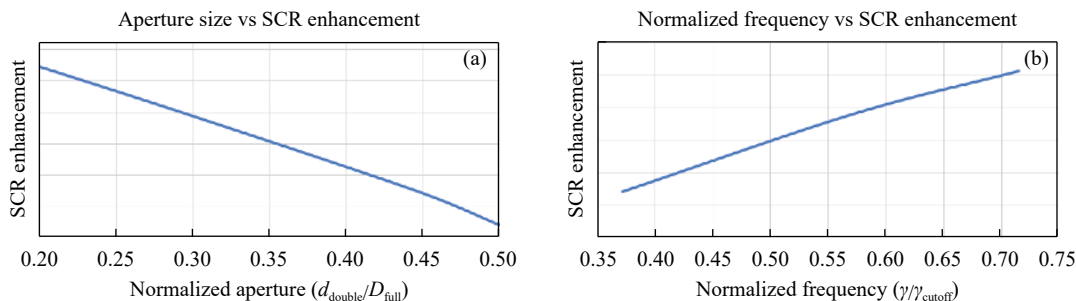


图 4 影响信杂比因素分析

Fig.4 Factors impacting SCR

3.2 信号和杂波的理想模型仿真

以周期 50 lp/mm, 灰度 20 阶的信号作为目标信号,以 20、40、80、94 lp/mm 为杂波信号。先对信号和杂波进行 MTF 分析。信号 50 lp/mm 在双孔径中略有增强,杂波 20、80、94 lp/mm 在双孔径中基本全部抑制,40 lp/mm 的杂波也有很大程度的抑制,如图 5 所示。

然后对此信号和杂波进行 Matlab 仿真。图 6(a) 是原始信号和杂波,图 6(b) 是经过双孔径的成像图,图 6(c) 是经过单孔径的成像图。和 MTF 分析相对应,在双孔径中 20、80、94 lp/mm 的杂波基本全部抑制,40 lp/mm 的杂波也大部分抑制,信号 50 lp/mm 得以保留。

最后采用公式 (2) 对图像的信杂比进行评价,双孔径相对于单孔径信杂比增加了 23%,如表 1 所示。

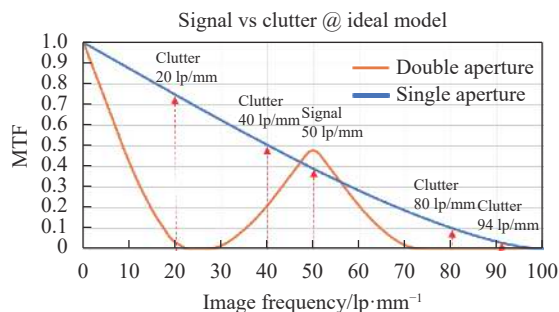


图 5 信号和杂波的单孔径和双孔径 MTF 比较

Fig.5 MTF comparison for signal and clutter in double aperture and single aperture

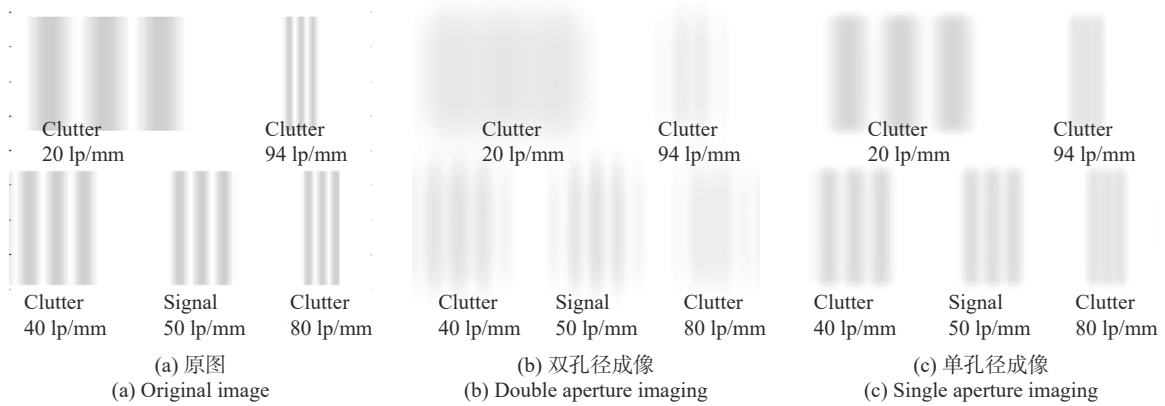


图 6 理想模型双孔径和单孔径比较

Fig.6 Ideal model comparison of double aperture and single aperture

表 1 理想模型信杂比增强

Tab.1 SCR enhancement for ideal model

Item	Single aperture	Double aperture	SCR enhancement
SCR/dB	-44.6	-34.2	+23.3%

3.3 弱纹理模型仿真

文中基于参考文献 [10] 模拟潜艇航行时产生的水面纹理 (周期大约为 20 m), 图 7(a) 示出考虑海浪和风速对纹理对比度的削弱作用, 叠加上更多复杂的低频和高频背景杂波, 图 7(b) 更真实模拟潜艇水面弱纹理信号, 其特点是背景杂波信号强, 纹理信号振幅弱,

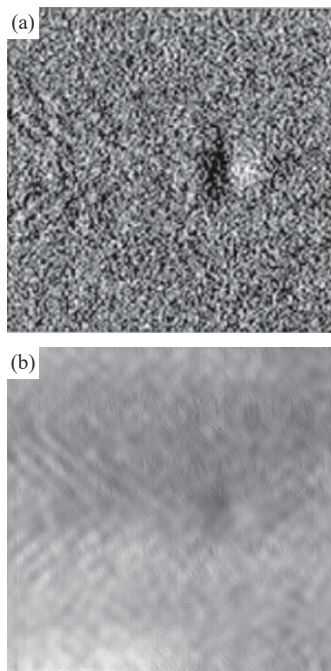


图 7 Kelvin 尾迹和弱纹理信号图像模拟

Fig.7 Kelvin wake and weak texture signal image simulation

纹理有一定的频率分布。

根据公式 (2) 对图 7(b) 进行信杂比计算, 得到双孔径相对于单孔径信杂比增强 7%。从表 2 可以看出, 第一行是图 7(b) 分别经过单孔径和双孔径的仿真图, 第二行是单孔径和双孔径函数, 第三行是孔径函数的自相关, 即非相干光学传递函数, 第四行是经过数字对比度增强的效果。可见双孔径相比单孔径可以更有效地提取微弱的纹理信号, 再结合数字对比度增强使得弱纹理更加清晰。

表 2 双孔径对 Kelvin 尾迹的低频和高频部分信杂比增强比较

Tab.2 SCR enhancement comparison between low frequency and high frequency of Kelvin wake through double aperture

Item	Single aperture	Double aperture
Imaging		
Aperture function		
Non-interference MTF		
Digital contrast enhancement		

4 实验验证

为了验证双孔径光瞳滤波的效果, 结合第 3 节的仿真进行了实验。

4.1 光学设计和实验装置

探测器上的目标频率 50 lp/mm, 对应实际纹理的频率 1.5 lp/mm, 根据该条件设计孔径光阑, 见图 8。

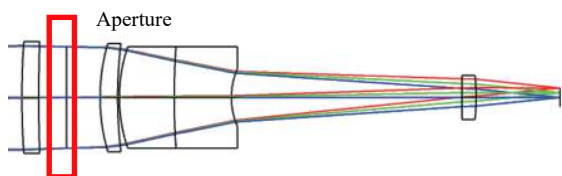


图 8 光学系统图
Fig.8 Optical layout

光学系统关键参数如表 3 所示 (表中, 1 in=2.54 cm)。

将信号和杂波在该光学系统的 MTF 图中进行比较。物面信号频率 1.5 lp/mm 在双孔径中略有增强, 0.5~1.0 lp/mm 的杂波分量基本抑制, 其余杂波分量也都有一定程度的抑制, 如图 9 所示。

实验装置如图 10 所示, 将光学系统 (Optical sy-

表 3 光学系统设计参数

Tab.3 Specification of optical system

Item	Parameter of optical system	Specification
1	Numeric aperture	0.1
2	Focal length/mm	153
3	Object distance/mm	6 000
4	Magnification	0.03
5	Camera parameter	Sensor size 1/3 in Pixel size 1.67 μm

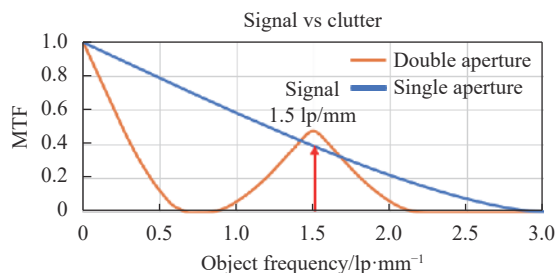


图 9 信号和杂波在双孔径和单孔径 MTF 中的比较

Fig.9 Comparison of signal and clutter in MTF of double aperture and single aperture

stem) 对准分辨率靶标 (reticle) 成像, 分辨率靶标用光源照明 (LED light source) 照亮, 光学系统接收靶标

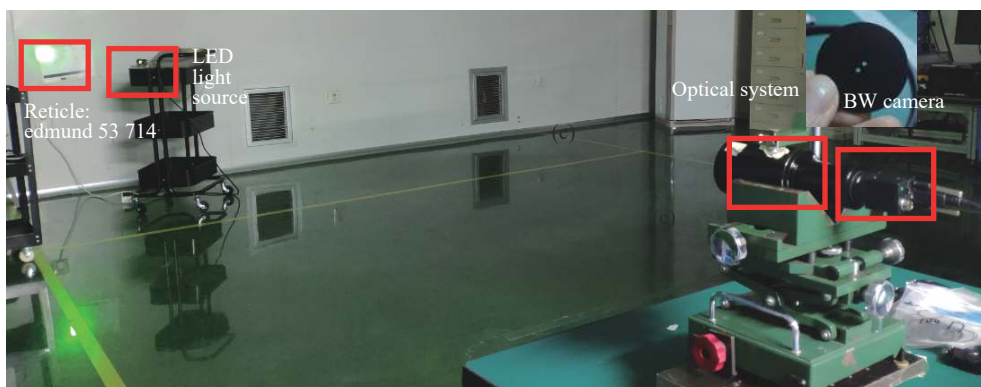


图 10 实验装置

Fig.10 Experiment setup

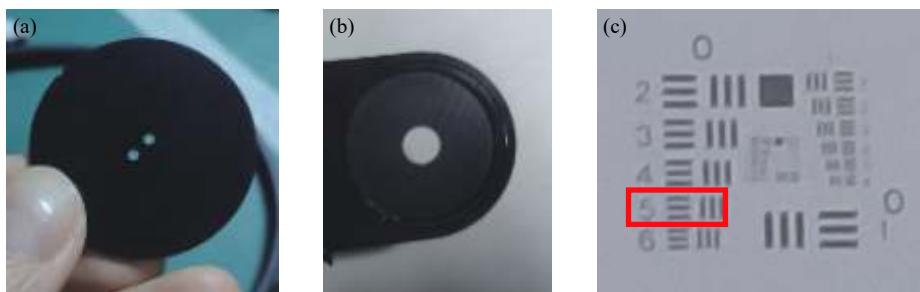


图 11 双孔径光阑, 单孔径光阑和分辨率靶标

Fig.11 Double aperture diaphragm, single aperture diaphragm and resolution target

(reticle) 漫反射成像,用黑白相机 (BW camera) 拍摄。

在光学系统孔径光阑的位置,插入单孔径光阑和双孔径光阑进行对比成像,如图 11(a) 和图 11(b) 所示,旋转双孔径光阑得到目标分辨率线对横方向或竖方向最清晰像。

实验靶标采用 Edmund 的 53 714 灰度渐变靶标。选取第 11 个分辨率图形 (OD 为 0.49), 以第 0 组第 5 个线对 (1.5 lp/mm) 为目标, 对应的像面频率就是 50 lp/mm, 其余频率都是杂波, 如图 11(c) 所示。

4.2 双孔径信杂比增强结果

根据公式 (2) 对实验图像进行信杂比评价, 双孔径相比于单孔径的信杂比增强为 11.2%, 见表 4。

对 3.2 节理想模型、3.3 节弱纹理模型和本节的实验靶标, 其信杂比增强不同, 主要是由于杂波的频率相对于双孔径抑制杂波的频率区间不同导致的, 如果杂波正好落在 0.5~1.0 lp/mm 或者 2.0~3.0 lp/mm 的频率区间, 则会有比较好的信杂比增强效果, 如果杂波落在 0~0.5 lp/mm 或者 1.0~2.0 lp/mm, 则信杂比增强效果减弱。

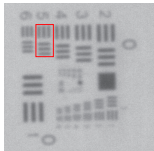
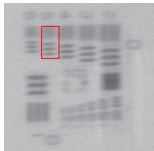
3.2 节中的理想模型, 杂波分量在 2.0~3.0 lp/mm

的频率区间比较多, 所以信杂比增强比较高。3.3 节的弱纹理模型, 杂波分量在 0~0.5 lp/mm 的频率区间比较多, 所以信杂比增强较弱。此节中的杂波分布比较均匀, 因此信杂比增强在两者之间。

为了验证非相干光学滤波在实际波纹中的信杂比增强和杂波抑制效果, 用螺旋桨搭建水波模型, 如图 12(a) 所示。用图 8 的光学系统拍摄单孔径和双孔径的成像图, 分别是图 12(b) 和图 12(c) 所示。目标频率为红色框内的纹理, 杂波为绿色框内的纹理。双孔径相对于单孔径红框内的目标纹理得以保留并略有增强, 绿框内的杂波纹理基本抑制。

表 4 不同孔径信杂比增强比较

Tab.4 SCR enhancement comparison of different apertures

Type of aperture	Single aperture	Double aperture
Imaging		
SCR enhancement	-	+11.2%



(a) 成像对比实验装置
(a) Setup for imaging comparison



(b) 单孔径成像
(b) Imaging from single aperture



(c) 双孔径成像
(c) Imaging from double aperture

图 12 单孔径和双孔径实际成像效果比较

Fig.12 Imaging effect comparison between double aperture and single aperture

5 结 论

文中根据水面弱纹理的特征,采用信杂比评价方式,提出了一种基于非相干光学滤波提升信杂比的方法,然后通过仿真和实验,验证了该方法的可行性。根据仿真和实验结果,弱纹理模型的信杂比有7%以上的提升。再结合后续的数字对比度增强技术可以有效提高对弱纹理信号的提取能力。

参考文献:

- [1] Yang Weiping, Zhang Zhilong, Li Jicheng, et al. Thermal wakes detectability of submerged objects based on scale model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0302002. (in Chinese)
杨卫平, 张志龙, 李吉成, 等. 基于缩比模型的水下目标热尾流可探测性研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(3): 0302002.
- [2] Wang Ping, Du Yongcheng, Yang Li. Numerical and experimental study on the buoyancy and diffusion laws of submarine thermal wake based on overset grid technology and VOF model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0404002. (in Chinese)
王平, 杜永成, 杨立. 基于重叠网格技术和VOF模型的潜艇热尾流浮升扩散规律的数值与实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4): 0404002.
- [3] Lai Qingzhi. Analysis on diffusion characteristics of submerged body thermal wake in ocean stratified flow[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
来庆志. 海洋分层流中潜艇体热尾流扩散特征分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [4] Zhang Xudong, Guo Liang, Hu Richa, et al. Heat and mass transfer characteristics of submarine cold-thermal wake in the infrared detection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(01): 107-114. (in Chinese)
张旭升, 郭亮, 胡日查, 等. 红外探测中潜艇冷热尾流的传热传质特性[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(01): 107-114.
- [5] Zhou Zhe, Bai Zongliang, Shi Jingcheng. The study on the simulation method based on temperature interpolation technology for the buoyancy law and ocean-surface thermal characteristic of submarine wake [J]. *Infrared Technology*, 2019(41): 1025-1032. (in Chinese)
周哲, 白宗良, 史径丞, 等. 基于温度插值技术的潜艇热尾流浮升规律及海面热特征仿真方法研究[J]. *红外技术*, 2019(41): 1025-1032.
- [6] Cheng Xiong. Infrared characteristics analysis of the sea surface under coupling effects of the submarine's hydrodynamic wake and thermal wake[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017. (in Chinese)
陈雄. 潜艇水动力尾迹与热尾迹耦合作用下海面红外特性分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [7] Huang Miaomiao, Zhang Nan, Zhu Aijun. Hydrodynamic loads and motion features of a submarine with interaction of internal solitary waves [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2019, 23(5): 531-540. (in Chinese)
黄苗苗, 张楠, 朱爱军. 内波作用下水下航行体水动力载荷及运动特性研究[J]. *船舶力学*, 2019, 23(5): 531-540.
- [8] Li Danmeng, Jin Weiqi, Li Li, et al. Numerical simulation and analysis of free-surface wake generated by moving submerged target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1126004. (in Chinese)
李丹梦, 金伟其, 李力, 等. 水下运动目标的水面波纹数值模拟及分析[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1126004.
- [9] Zhang Xusheng, Guo Liang, Hu Richa, et al. Cold-thermal wake characteristics of submarine in temperature-density stratified seawater[C]//SPIE Proceedings, 2019, 11023: 1102356.
- [10] Zhang Shicheng, Yang Zhen, Yang Li, et al. Infrared characterization and detection of free surface wave wake of underwater vehicle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2615-2620. (in Chinese)
张士成, 杨桢, 杨立, 等. 水下航行体自由表面波浪尾迹红外特征及探测[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2615-2620.
- [11] Xu Man, Qiu Su, Jin Weiqi, et al. Radon transform detection method for underwater moving target based on water surface characteristic wave [J]. *Acta Optics Sinica*, 2019, 39(10): 1001003. (in Chinese)
徐曼, 裘溯, 金伟其, 等. 基于水面特征波纹的水下运动目标Radon变换探测方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1001003.
- [12] Zhong Rui, Yang Li, Du Yongcheng. Deep transfer learning for underwater vehicle wake recognition in infrared imagery[C]//SPIE Proceedings, 2019, 11333: 11333U.
- [13] Hu Jianming, Qiao Kai, Zhi Xiyang. Influence of complex environment on the detectability of weak and small aerial target under space-based observation mode [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2019, 38(3): 351-357. (in Chinese)
胡建明, 乔凯, 智喜洋. 天基观测条件下复杂环境对空中弱小目标可探测性的影响[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(3): 351-357.
- [14] Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics[M]. 2nd ed. Beijing:

Science Press, 2011: 235-268. (in Chinese)

苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2011: 235-268.

[15] Hao Weiqian, Liang Zhongcheng, Liu Xiaoyao, et al. Imaging

performance of fractal structure sparse aperture arrays [J]. *Acta Phys Sin*, 2019, 68(19): 199501. (in Chinese)

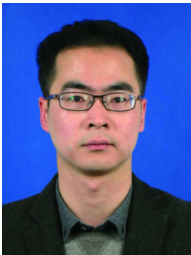
郝未倩, 梁忠诚, 刘肖尧, 等. 分形结构稀疏孔径阵列的成像性能[J]. *物理学报*, 2019, 68(19): 199501.



第一作者简介: 张祥翔 (1981-), 女, 博士生, 研究方向为红外系统成像技术, 主要从事星载、机载海洋遥感探测红外技术, 系统分析集成和数据仿真等方面的研究。Email: xiangxiang_zhang@163.com



导师简介: 傅雨田 (1967-), 男, 博士生导师, 现任上海技术物理研究所工程九室主任, 研究员, 博士生导师, 上海宇航学会会员。主要从事红外成像遥感技术的研究。曾负责完成国家 863 项目等相关课题。在国内外杂志上发表研究论文多篇。目前正负责国家重大项目的研究。Email: yutianfu@mail.sitp.ac.cn



通讯作者简介: 陈永和 (1982-), 男, 副主任设计师, 现任上海技术物理研究所工程九室主任助理。主要从事空间光学成像遥感技术、低温光学技术、遥感仪器杂散光抑制技术方面的研究, 获得军队科技进步一等奖。Email: chen Yonghe@mail.sitp.ac.cn