

水下高重复频率脉冲激光全选通成像雷达 对比度信噪比模型

王银飞, 张晓晖*, 钟炜, 韩宏伟

海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430033

摘要 为了评价高重复频率系统在每个选通切片中的成像质量, 为脉冲分配策略的研究提供依据, 在 Jaffe-McGlamery 模型的基础上, 建立描述高重复频率系统信号传输过程的理论模型, 分析图像退化因素, 提出一种高重复频率系统成像质量评价模型。采用重复频率为 4 kHz 的脉冲激光器, 对黑白条纹靶板目标进行成像。实验结果表明, 从目标开始成像到出现饱和前的线性区间内, 该理论模型的结果与实验结果相吻合, 误差不超过 10%。

关键词 海洋光学; 对比度信噪比; 高重复频率激光成像系统; 成像雷达

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0701003

Contrast Signal-to-Noise Ratio Model of Underwater Full Range-Gated Imaging Radar Based on High-Repetition-Rate Pulse Laser

Wang Yinfei, Zhang Xiaohui*, Zhong Wei, Han Hongwei

College of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract In order to evaluate the imaging quality of a high-repetition-rate system in each gated slice and provide fundamental elements for the study of pulse allocation strategy, a theoretical model describing the signal transmission process of the high-repetition-rate system is established based on the Jaffe-McGlamery model, and the factors of image degradation are analyzed. Specifically, an image quality evaluation model of the high-repetition-rate system is proposed herein. Experimentally, a pulsed laser having a repetition rate of 4 kHz is used to image a black-and-white stripe target. Results show that measured values of the experimental image fit well with the calculated values of the model on a linear range from the beginning of the target imaging to the occurrence of saturation, with an estimated error not exceeding 10%.

Key words oceanic optics; contrast signal-to-noise ratio; high-repetition-rate laser imaging system; imaging radar

OCIS codes 010.4450; 010.7295; 110.3000

1 引 言

激光成像技术是水下装备和载体探测目标的重要手段之一^[1], 连续光成像受后向散射噪声影响较大, 作用距离较短^[2]。距离选通成像能够有效抑制后向散射噪声, 增加成像距离, 世界上广泛应用的距离选通激光成像系统为加拿大国防研究所的 Laser Underwater Camera Image Enhancer(LUCIE)系列产品, 该产品从 1990 年问世至今已历经 3 次更新换代, 其发展趋势是所采用激光器的重复频率越来越

高, 参数控制的灵活性及自动化程度越来越高, 平均功率越来越低, 体积和质量越来越小^[3-4]。

传统距离选通成像系统只能对某一距离的选通切片(距离选通成像所选通的区域)成像, 即定距成像^[5]。水下高重复频率脉冲激光全选通成像雷达(以下简称“高重复频率系统”)采用重复频率较高的激光器作为光源, 在距离选通成像系统的基础上, 将一帧图像积分时间内的大量激光脉冲按照一定策略分配到不同距离选通切片中, 实现了探测区域的全选通成像, 因此高重复频率系统同时拥有连续光成

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2018-12-27; 录用日期: 2019-03-13

基金项目: 海装十二五预先研究基金(4010501050401)、海军工程大学自然科学基金(435517D43)

* E-mail: zhangxiaohui505@sina.vip.com

像系统探测范围大和传统距离选通成像系统探测距离远的优点^[6]。海军工程大学开展了高重复频率系统样机的研制,在实验上验证了该系统全选通成像技术的可行性^[6-7]。

求解脉冲数分配策略是高重复频率系统全选通成像的关键问题之一。给每个选通切片中分配的脉冲数太少时,目标不能清晰成像;分配的数量太多时则可能出现图像饱和现象,且可能造成总脉冲数不够分配等问题^[6]。研究系统成像质量的评价标准以及建立系统成像模型是脉冲数分配策略研究的前提,高重复频率系统在全选通成像时,信号传输过程复杂,信噪比和对比度均会产生不同程度的退化,现有模型不能很好地满足需求。

根据约翰逊准则,在不考虑目标本质和图像缺陷的情况下,可采用目标等效条纹分辨力确定成像系统对目标的识别能力^[8],因此,本文采用黑白条纹靶板作为成像目标,分析图像退化的主要因素;利用对比度信噪比评价黑白条纹目标成像质量;在Jaffe-McGlamery模型的基础上,推导黑白条纹目标对比度传递函数,并建立对比度信噪比模型;最

后,进行水下成像实验,通过对比分析实验图像的对比度信噪比和模型计算值,验证模型的适用性。

2 黑白条纹目标图像质量评价指标

高重复频率系统在水下对目标成像时,造成图像质量退化的主要因素可以归结为:1)水体及光电成像系统的空间扩展作用导致黑白条纹目标对比度降低^[9];2)水体后向散射噪声导致图像局部区域平均灰度整体升高^[10];3)系统噪声造成图像信噪比降低,系统噪声主要为 ICCD (intensified charge-coupled device)的乘性噪声^[11]。因此,利用计算机添加高斯乘性噪声,改变黑白条纹图像对比度和平均灰度来模拟高重复频率系统对黑白条纹目标的成像结果。仿真结果如图 1 所示。图 1(a)所示为原始图像,条纹空间频率从左至右由 0.5 pixel^{-1} 增至 0.031 pixel^{-1} ,平均灰度为 100,白、黑条纹绝对对比度(黑白条纹灰度差)为 40,高斯噪声强度为 0.1;图 1(b)中,从上至下图像平均灰度由 100 降至 40;图 1(c)中,从上至下条纹绝对对比度由 40 降至 1;图 1(d)中,从上至下图像高斯噪声强度由 0.1 升至 10。

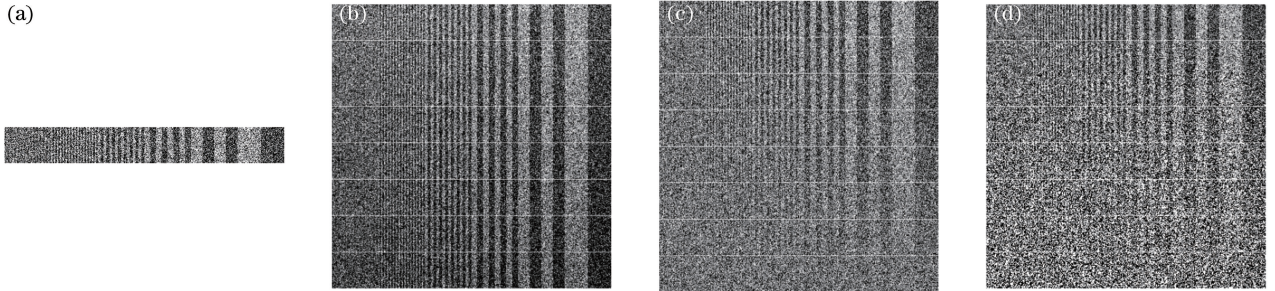


图 1 高重复频率系统成像结果仿真。(a)原始图像;(b)平均灰度的影响;(c)绝对对比度的影响;(d)噪声强度的影响
Fig. 1 Simulation of imaging results of high-repetition-rate system. (a) Original image; (b) influence of mean gray level; (c) influence of absolute contrast; (d) influence of noise intensity

比较图 1 中黑白条纹的清晰程度可以得出,图像中黑白条纹的清晰程度与条纹绝对对比度成正比,与图像噪声成反比,与图像平均灰度基本无关。借鉴微光成像质量评价中品质因数的定义^[12],利用对比度信噪比 $R_{CN}(k_{\psi_x})$ 评价角空间频率为 k_{ψ_x} 的黑白条纹目标图像质量,则有

$$R_{CN}(k_{\psi_x}) = \frac{S_{\text{white}}(k_{\psi_x}) - S_{\text{black}}(k_{\psi_x})}{N}, \quad (1)$$

式中: $S_{\text{black}}(k_{\psi_x})$ 和 $S_{\text{white}}(k_{\psi_x})$ 分别为黑、白条纹信号强度; N 为图像噪声强度; ψ_x 为水平方向的空间角坐标。输出图像的 $R_{CN}(k_{\psi_x})$ 越小,黑白条纹的辨识难度越大。

3 黑白条纹目标对比度传递函数

Jaff-McGlamery模型认为水体是线性空间不变系统^[13],输出图像是原始图像与系统点扩展函数的卷积。设目标面上坐标为 (x, y) ,距离为 L 处被照明的原始图像为 $f(x, y, L)$,在探测器相面 (x', y', L) 上的成像效果 $s(x', y', L)$ 可表示为

$$s(x', y', L) = f\left(\frac{f_{\text{re-lens}}}{L}x, \frac{f_{\text{re-lens}}}{L}y, L\right) * f_{\text{PS}}(x', y', L), \quad (2)$$

式中:“ $*$ ”表示对目标面 x 和 y 坐标方向的二维卷积; $f_{\text{re-lens}}$ 为成像系统的像距; $f_{\text{PS}}(x', y', L)$ 为系统点扩展函数。

如图 2 所示,假设水下激光成像系统满足“近轴条件”^[14],物点 $A(x, y, L)$ 与像点 $A'(x', y', -f_{\text{re-lens}})$ 的坐标满足 $x/L = x'/f_{\text{re-lens}}$ 和 $y/L = y'/f_{\text{re-lens}}$ 。采用坐标变换可将空间直角坐标系转化为角空间坐标系 (ψ_x, ψ_y) ^[13],即

$$\begin{cases} \psi_x = \frac{x}{L} = \frac{x'}{f_{\text{re-lens}}} \\ \psi_y = \frac{y}{L} = \frac{y'}{f_{\text{re-lens}}} \end{cases} \quad (3)$$

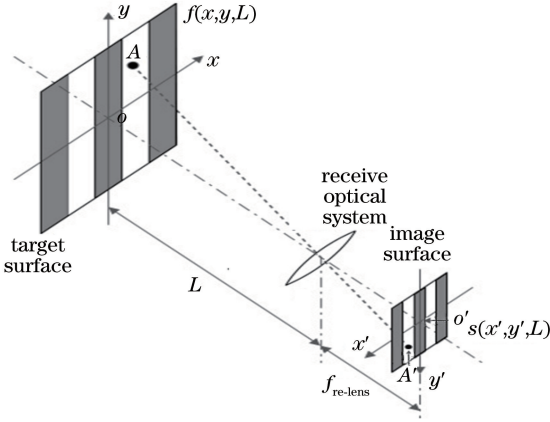


图 2 成像模型

Fig. 2 Imaging model

(2)式及其二维 Fourier 变换可改写为

$$\begin{cases} s(\psi_x, \psi_y, L) = f(\psi_x, \psi_y, L) * f_{\text{PS}}(\psi_x, \psi_y, L) \\ S(k_{\psi_x}, k_{\psi_y}, L) = F(k_{\psi_x}, k_{\psi_y}, L) \cdot F_{\text{MT}}(k_{\psi_x}, k_{\psi_y}, L) \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_{ψ_x}, k_{ψ_y} 为角空间频率; $S(k_{\psi_x}, k_{\psi_y}, L), F(k_{\psi_x}, k_{\psi_y}, L)$ 分别为 $s(\psi_x, \psi_y, L), f(\psi_x, \psi_y, L)$ 的 Fourier 变换形式; $F_{\text{MT}}(k_{\psi_x}, k_{\psi_y}, L)$ 为系统的调制传递函数,与 $f_{\text{PS}}(\psi_x, \psi_y, L)$ 互为 Fourier 变换。 $F_{\text{MT}}(k_{\psi_x}, k_{\psi_y}, L)$ 主要包括水体调制传递函数 $F_{\text{MT-water}}$ ^[7] 和 ICCD 的调制传递函数 $F_{\text{MT-OE}}$ ^[15],可表示为

$$F_{\text{MT}}(k_{\psi_x}, k_{\psi_y}, L) = F_{\text{MT-OE}} F_{\text{MT-water}} = \exp\{[Q(k_{\psi_r}) - (a + b)]L\} \cdot \exp(-2\pi\sigma k_{\psi_r}/f_{\text{re-lens}}), \quad (5)$$

式中: $\psi_r = \sqrt{\psi_x^2 + \psi_y^2}$; a, b 分别为水体吸收和散射系数; $Q(k_{\psi_r})$ 为空间扩展系数; σ 为与单次散射角中位数有关的参数。

设目标为方波黑白条纹,输入信号为 $B_1 + \Delta B_1 f_{\text{rec}}(k_{\psi_x})$,其中 $B_1, \Delta B_1$ 分别为输入信号的平均强度和振幅, $f_{\text{rec}}(k_{\psi_x})$ 和 $f_{\text{cos}}(k_{\psi_x})$ 分别表示振幅为 1,角空间频率为 k_{ψ_x} 的方波函数和余弦函数,将 $f_{\text{rec}}(k_{\psi_x})$ 展开为 Fourier 级数 $\frac{4}{\pi} \left[f_{\text{cos}}(k_{\psi_x}) - \frac{1}{3} f_{\text{cos}}(3k_{\psi_x}) + \dots \right]$ 。高重复频率系统为空间不变线性系统^[16],输出、输入信号幅度的比值满足系统调制传递函数 $F_{\text{MT}}(k_{\psi_x})$,设 ξ 为系统对信号的响应度,输出信号平均强度和振幅为 B_2 和 ΔB_2 ,则系统输出信号为

$$S_{\text{out}} = B_2 + \Delta B_2 = \xi B_1 + \xi \Delta B_1 \frac{4}{\pi} \left[f_{\text{cos}}(k_{\psi_x}) F_{\text{MT}}(k_{\psi_x}) - \frac{1}{3} f_{\text{cos}}(3k_{\psi_x}) F_{\text{MT}}(3k_{\psi_x}) + \frac{1}{5} f_{\text{cos}}(5k_{\psi_x}) F_{\text{MT}}(5k_{\psi_x}) + \dots \right] \quad (6)$$

对比度传递函数 $F_{\text{CT}}(k_{\psi_x})$ 为输出、输入方波信号对比度的比值,描述系统对方波黑白条纹目标对比度的退化程度^[17],可表示为

$$F_{\text{CT}}(k_{\psi_x}) = \frac{2\Delta B_2/2B_2}{2\Delta B_1/2B_1} = \frac{4}{\pi} \left[F_{\text{MT}}(k_{\psi_x}) - \frac{1}{3} F_{\text{MT}}(3k_{\psi_x}) + \frac{1}{5} F_{\text{MT}}(5k_{\psi_x}) + \dots \right] \quad (7)$$

若高重复频率系统对初始对比度为 C 的方波黑白条纹目标成像,则输出图像目标对比度为 $C' = CF_{\text{CT}}(k_{\psi_x})$ 。

4 黑白条纹目标对比度信噪比模型

图 3 所示为高重复频率系统全选通成像模式下的一种选通切片划分方式,将高重复频率样机的成像范围 $[0, L_{\text{max}}]$ 划分为 n 个宽度为 Δ 的等分布选通切片,选通切片由近及远依次编号,各切片的距离分别

为 L_1, L_2, \dots, L_n ,在一帧图像的积分时间内,系统在各选通切片中所分配的激光脉冲数为 $\{u(1), u(2), \dots, u(n)\}$ 。设角空间频率为 $k_{\psi_x 0}$ 的黑白条纹位于 L_m 处第 $m(m \leq n)$ 个选通切片起始位置,黑、白条纹在水下的反射率分别为 r_{black} 和 r_{white} ,在第 m 个选通切片中,假设目标 Δs_m 区域(包含点 A_m)内的光照均匀,其平均反射率为 $(r_{\text{white}} + r_{\text{black}})/2$,目标(物面)上 Δs_m 区域和点 A_m 分别与 ICCD 光电阴极(像面)上的 $\Delta s'_m$ 区域和点 A'_m 相对应。近轴条件下, $\Delta s'_m$ 区域内光照同样均匀。

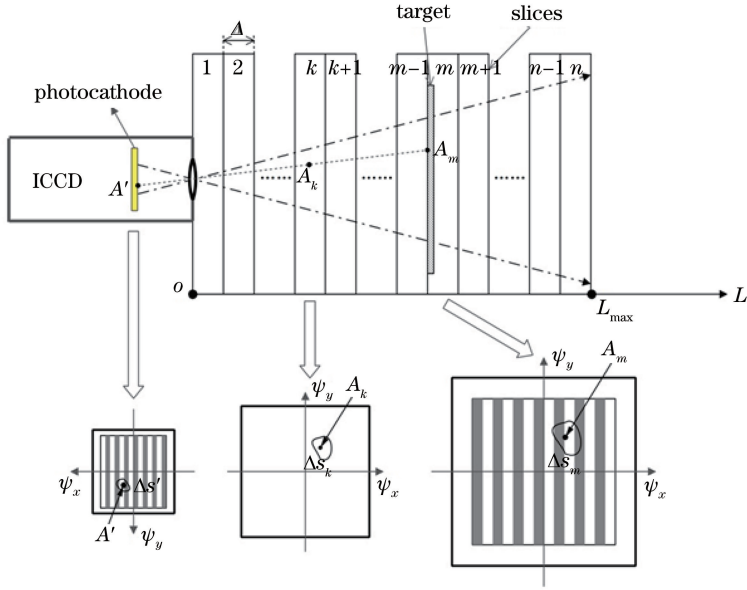


图 3 高重复频率系统的 R_{CN} 模型

Fig. 3 R_{CN} model of high-repetition-rate system

如图 4 所示, Δs_m 区域的反射光通量只有通过接收镜头的部分(立体角 Ω_1 内)才能到达 ICCD 光电阴极的 $\Delta s'$ 区域, 其中 $\Phi_{\text{mean-emit}}$ 为目标反射的平均光通量。设第 m 个选通切片中的脉冲数为 $u(m)$,

激光器单脉冲能量为 E_{laser} , 镜头通光口径为 D , 为了简化运算, 假设目标为朗伯反射体, 则点 A' 处的累积的光照度为

$$i_{\text{cathode-}m}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_m, u(m)] = \frac{D^2}{8f_{\text{re-lens}}^2} \exp(-cL_m) u(m) E_{\text{laser}} i(\psi_r, L_m) \frac{r_{\text{white}} + r_{\text{black}}}{2}, \quad (8)$$

式中: $i(\psi_r, L_m)$ 为文献[7]中激光照明模型得到的激光束传输到距离 L_m 处的照度分布; (ψ_{x0}, ψ_{y0}) 为 A' 处对应的角空间坐标; c 为真空中的光速。由黑白条纹目标的反射率可得初始对比度为 $C(k_{\psi_{x0}}) = \frac{r_{\text{white}} - r_{\text{black}}}{r_{\text{white}} + r_{\text{black}}}$, 设 Δs_m 内黑、白条纹区域反射光在 $\Delta s'$ 上的照度分别为 $i_{\text{cathode-white-}m}$ 和 $i_{\text{cathode-black-}m}$, 则 $\Delta s'$ 区域内目标图像的对比度为

$$C'(k_{\psi_{x0}}) = F_{\text{CT}}(k_{\psi_{x0}}) C(k_{\psi_{x0}}) = \frac{i_{\text{cathode-white-}m} - i_{\text{cathode-black-}m}}{i_{\text{cathode-white-}m} + i_{\text{cathode-black-}m}} = \frac{i_{\text{cathode-white-}m} - i_{\text{cathode-black-}m}}{2i_{\text{cathode-}m}}. \quad (9)$$

由(8)式和(9)式可求得 $\Delta s'$ 区域内黑、白条纹的光照度分别为

$$\begin{cases} i_{\text{cathode-white-}m}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_m, u(m), k_{\psi_{x0}}] = i_{\text{cathode-}m}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_m, u(m)] \cdot [1 + C'(k_{\psi_{x0}})] \\ i_{\text{cathode-black-}m}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_m, u(m), k_{\psi_{x0}}] = i_{\text{cathode-}m}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_m, u(m)] \cdot [1 - C'(k_{\psi_{x0}})] \end{cases}. \quad (10)$$

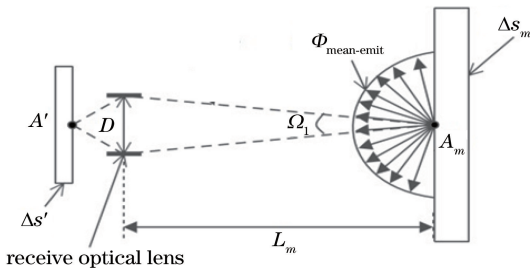


图 4 Δs_m 区域反射光通量

Fig. 4 Reflective luminous flux of Δs_m area

高重复频率系统工作在全选通模式时将激光脉冲分配到探测区域内不同距离选通切片中, 认为该目标遮蔽了其后方水体的后向散射光。ICCD 在一帧图像的积分时间内不仅接收目标的反射回波, 也接收目标前其他选通切片内的水体后向散射噪声, 如图 3 所示。假设第 k ($k < m$) 个选通切片中没有目标, 点 A_m 和点 A' 连线与第 k 个选通切片相交于点 A_k , Δs_m 和 $\Delta s'$ 区域对应于第 k 个选通切片 Δs_m 区域(包含点 A_k), 为了研究选通切片中散射能量的分

布,如图 5 所示,在第 k 个选通切片建立坐标系,坐标原点位于宽度为 Δ 的选通切片起始位置,光束被整个选通切片散射的光通量 $\Phi_{\text{scattering}}$ 为

$$\Phi_{\text{scattering}} = \int_0^{\Delta} \exp[-(a+b)L_0] \Delta s_k u(k) E_{\text{laser}} i(\psi_r, L_k) b \cdot dL_0 = \frac{b \Delta s_k u(k) E_{\text{laser}} i(\psi_r, L_k)}{a+b} \{1 - \exp[-(a+b)\Delta]\}. \quad (11)$$

如图 6 所示, Δs_k 区域内的水体散射光只有通过接收光学镜头的部分,即立体角为 Ω_2 内,散射角 $[\pi - D/2L_k, \pi]$ 区域内才能到达光电阴极,则第 k 个选通切片的后向散射光在点 A' 处的光照度为

$$i_{\text{cathode-}k}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_k, u(k)] = \frac{\int_{\pi - \frac{D}{2L_k}}^{\pi} \beta(\theta) d\theta \cdot \Phi_{\text{scattering}}}{\Delta s'} = \frac{L_k^2}{D^2} \int_{\pi - \frac{D}{2L_k}}^{\pi} \beta(\theta) d\theta \cdot \frac{b}{a+b} u(k) E_{\text{laser}} i(\psi_r, L_k) \cdot \{1 - \exp[-(a+b) \cdot \Delta]\}, \quad (12)$$

式中: $\beta(\theta)$ 为散射相函数。ICCD 光电阴极上点 A' 的总照度是第 $1 \sim m$ 个选通切片中回波的累积。设 ICCD 输出图像中每个像素对应光电阴极的面积为 S' , 光电阴极的量子效率为 η_{pc} , MCP(microchannel plate) 的平均增益为 G_{MCP} , 荧光屏的平均增益为 G_{Phos} , CCD 量子效率为 η_{CCD} , 积分时间为 τ , ICCD 光电阴极上点 A' 对应输出图像中点 A_{image} , 则由(10)式和(12)式可得 A_{image} 附近的黑、白条纹信号强度, 可分别表示为

$$\begin{cases} S_{\text{white}}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_m, u(m), k_{\psi_{x0}}] = \frac{\eta_{\text{pc}} \tau G_{\text{MCP}} G_{\text{Phos}} \eta_{\text{CCD}} S'}{h\nu} \cdot \left\{ \sum_{j=1}^{m-1} i_{\text{cathode-}j}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_j, u(j)] + i_{\text{cathode-white-}m}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_m, u(m), k_{\psi_{x0}}] \right\} \\ S_{\text{black}}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_m, u(m), k_{\psi_{x0}}] = \frac{\eta_{\text{pc}} \tau G_{\text{MCP}} G_{\text{Phos}} \eta_{\text{CCD}} S'}{h\nu} \cdot \left\{ \sum_{j=1}^{m-1} i_{\text{cathode-}j}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_j, u(j)] + i_{\text{cathode-black-}m}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_m, u(m), k_{\psi_{x0}}] \right\} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: h 为普朗克常量; ν 为光频率。高重复频率系统噪声主要为 ICCD 噪声, 其主要包括乘性噪声(MCP 散粒噪声和荧光屏散粒噪声)和加性噪声(CCD 暗电流噪声和读出噪声)。ICCD 输出噪声以乘性噪声 N_{ICCD} 为主, 可表示为^[18]

$$N_{\text{ICCD}} = \sqrt{\frac{\eta_{\text{pc}} S' i_{\text{cathode}}(\psi_{x0}, \psi_{y0}) \tau}{h\nu} \cdot [(G_{\text{MCP}} G_{\text{Phos}} \eta_{\text{CCD}})^2 + (G_{\text{MCP}} G_{\text{Phos}} \eta_{\text{CCD}})]}, \quad (14)$$

式中: $i_{\text{cathode}}(\psi_{x0}, \psi_{y0})$ 为光电阴极上黑、白条纹累积照度的平均值, 可通过(10)式和(12)式求得。则输出图像中点 A' 附近黑白条纹目标的对比度信噪比为

$$R_{\text{CN}}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_m, u(m), k_{\psi_{x0}}] = \frac{S_{\text{white}}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_m, u(m), k_{\psi_{x0}}] - S_{\text{black}}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_m, u(m), k_{\psi_{x0}}]}{N} = \frac{2 \frac{\eta_{\text{pc}} \tau G_{\text{MCP}} G_{\text{Phos}} \eta_{\text{CCD}} S' i_{\text{cathode-}m}[\psi_{x0}, \psi_{y0}, L_m, u(m)] C(k_{\psi_{x0}}) F_{\text{CT}}(k_{\psi_{x0}})}{h\nu}}{\sqrt{\frac{\eta_{\text{pc}} S' i_{\text{cathode}}(\psi_{x0}, \psi_{y0}) \tau}{h\nu} \cdot [(G_{\text{MCP}} G_{\text{Phos}} \eta_{\text{CCD}})^2 + G_{\text{MCP}} G_{\text{Phos}} \eta_{\text{CCD}}]}}. \quad (15)$$

5 验结果与分析

由于没有成熟的激光脉冲数分配依据, 为了简化问题并降低实验引入的误差, 将靶板固定在高重复频率系统前 15 m 处, 使照射区域固定不变, 在高

重复频率系统全选通成像过程中, 只对目标所在的选通切片分配激光脉冲(脉冲数由 0 增加到 400), 其他选通切片中分配 0 个激光脉冲。实验所用目标靶板黑、白条纹反射率分别为 0.3 和 0.8, 靶板中成像取样区域条纹对系统张角为 0.0066 rad, 实验水

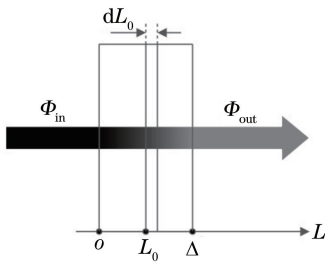


图 5 光束在无目标选通切片中的传输
Fig. 5 Propagation of laser beam ingated slices with no target

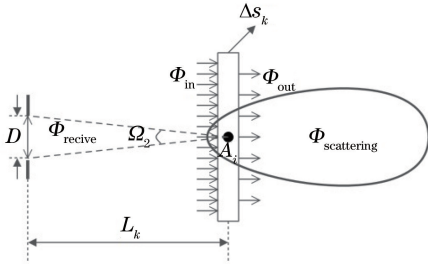


图 6 ΔS_k 区域散射光通量
Fig. 6 Scattering luminous flux of ΔS_k area

池长 100 m,宽 5 m,高 2 m,水深 1.54 m,实验水体散射系数 b 为 0.121 m^{-1} ,吸收系数 a 为 0.092 m^{-1} 。激光器采用华日公司生产的 Spruce-532/20-A 型调 Q 倍频 Nd:YAG 脉冲激光器,波长为 532 nm,单脉冲能量为 3 mJ,平均功率为 17 W,束腰位于出光口以内 100 mm 处,重复频率设置为 4 kHz,激光器出光口处使用扩束透镜,目标面上的照明半径为 0.5 m,ICCD 镜头为 1.27 cm、8~50 mm 三可变镜头;MCP 为 Stanford Computer Optics 公司生产的 Quantum Leap N 型像增强器,连续开门最高频率为 200 kHz,MCP 级间电压设置为 900 V;CCD 为 Allied Vision Technologies 公司生产的 Mako G-125B 型数字相机,帧频设置为 10 Hz。所获得的图像如图 7 所示。

取每幅图像中心照度均匀区域(如图 7 所示方框区域),求得各自黑、白条纹的平均灰度和平均噪声强度(即黑、白条纹灰度方差的平均值),代入(1)式得到对比度信噪比,对比度信噪比与累计回波数的关系如图 8 所示。

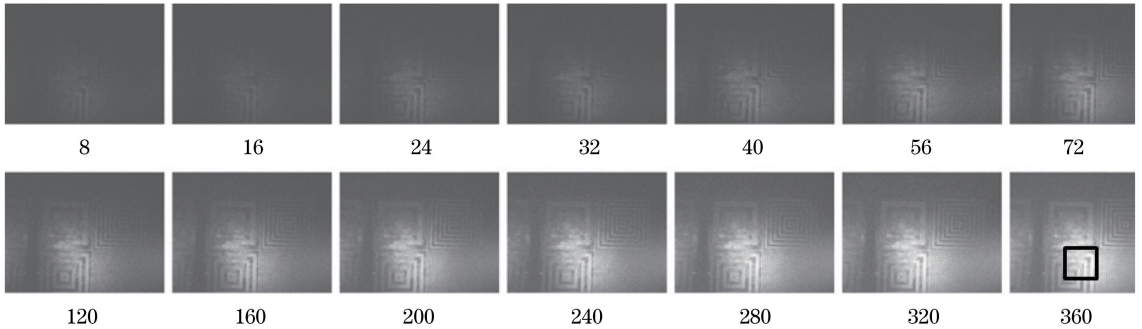


图 7 样机累积不同回波数所获得的图像

Fig. 7 Images of prototype for different cumulative echo numbers

将样机工作参数代入本文所推导的高重复频率系统对比度信噪比模型,即代入(15)式进行计算,部分参数的取值如表 1 所示,计算结果如图 8(d)所示。

表 1 高重复频率系统 R_{CN} 模型参数
Table 1 Parameters of R_{CN} model of high-repetition-rate system

Parameter	Value	Parameter	Value
η_{pc}	0.5	η_{CCD}	0.3
G_{phos}	0.3	S' / m^2	1.25×10^{-10}
G_{MCP}	237.6		

由实验结果可知,当累积脉冲数较少(小于 8)时,目标信号光能量太弱,高重复频率系统基本无法发现目标;当累积脉冲数过多(大于 150)时,目标图

像中的部分像素会因为 ICCD 动态响应范围有限而开始出现饱和,这时相比于黑条纹白条纹平均灰度增速减缓,如图 8(a)和图 8(b)所示;图像噪声强度开始下降,如图 8(c)所示;实验与仿真误差开始超过 10%,如图 9 所示。

本文在推导高重复频率系统对比度信噪比模型时,由于没有考虑图像饱和情况,所以当图像中的部分像素饱和之后,模型计算结果与实验结果的误差较大,由图 7、图 8(d)及图 9 可知,从可以发现目标到图像未出现饱和前(脉冲数 16~150),目标图像对比度信噪比(R_{CN})与累积回波数呈线性关系,模型计算的结果与样机的实验结果基本吻合,误差不超过 10%。

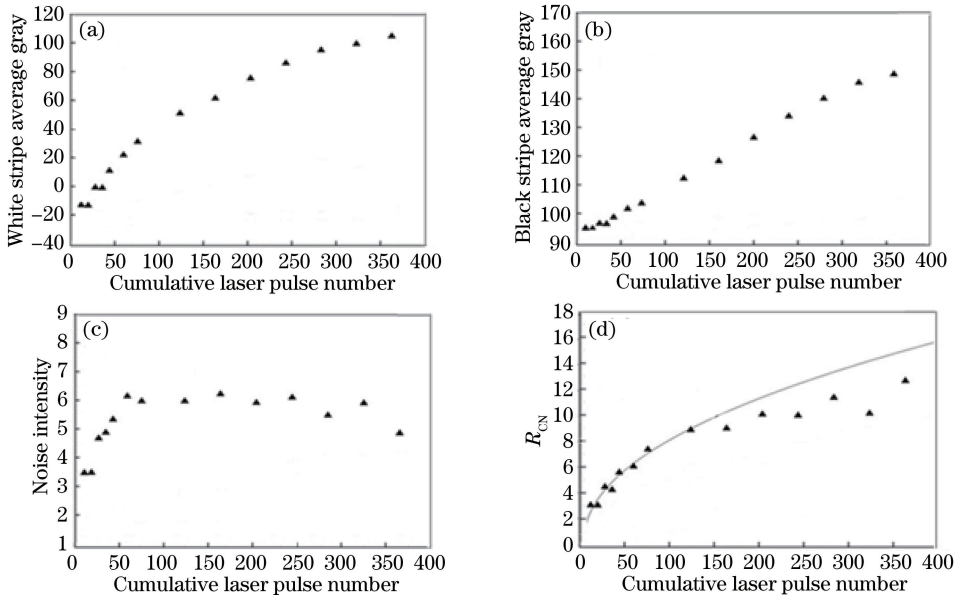


图 8 对比度信噪比与累计回波数的关系。(a)白条纹平均灰度；(b)黑条纹平均灰度；(c)噪声强度；(d) R_{CN}

Fig. 8 Relationship between contrast signal-to-noise ratio and cumulative echo numbers. (a) White stripe average gray; (b) black stripe average gray; (c) noise intensity; (d) R_{CN}

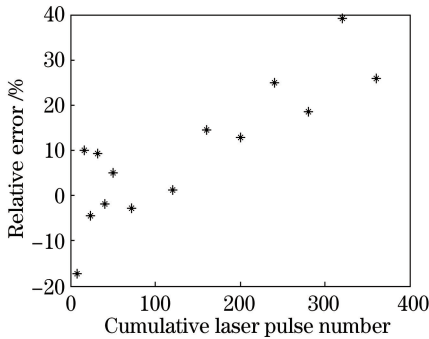


图 9 实测值与仿真值的相对误差

Fig. 9 Relative error of measured values compared with simulation values

6 结 论

水下高重复频率脉冲激光全选通成像系统在进行全选通成像时,不同距离选通切片中需要依据一定策略分配合适数量的激光脉冲,使得每个选通切片利用最少的脉冲数达到预期成像效果,将对比度信噪比作为高重复频率系统中黑白条纹目标成像质量的评价指标,在图像出现饱和现象前与分配的脉冲数呈线性关系,该结论可以作为分配激光脉冲的判据。在单个选通切片中,对比度信噪比是关于该选通切片分配的激光脉冲数的函数,可以根据预期的成像效果设置对比度信噪比阈值,然后通过对比度信噪比模型建立方程,并求解该选通切片中需要分配的脉冲数,进而求出所有选通切片中需要分配

的激光脉冲数,得到高重复频率系统全选通成像时的激光脉冲分配策略。对比度信噪比设置的阈值不同,所得的脉冲分配策略不同,高重复频率系统全选通成像效果也会不同,对比度信噪比模型的建立是求解脉冲分配策略的关键问题之一,对高重复频率脉冲激光全选通成像系统性能优化提升具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Quan X Q, Chen X Z, Quan Y Q, *et al.* Analysis and research progress of deep-sea optical illumination and imaging system [J]. Chinese Optics, 2018, 11 (2): 153-165.
全向前, 陈祥子, 全永前, 等. 深海光学照明与成像系统分析及进展 [J]. 中国光学, 2018, 11(2): 153-165.
- [2] Han J F. The design of portable underwater imaging system with continuous illumination and the research on enhancement technique of imaging quality [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
韩捷飞. 便携式水下连续光成像系统设计及成像质量增强技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [3] Weidemann A, Fournier G R, Forand L, *et al.* In harbor underwater threat detection/identification using active imaging [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5780: 59-70.
- [4] Fournier G R, Forand J L, Mathieu P, *et al.* Range-gated active underwater imaging: evolution,

- performance and perspectives [C] // Proceedings of Ocean Sciences Meeting's Presentation, March 2-7, 2008, Orlando, Florida, United States. [S. l.: s. n.], 2008: 1-29.
- [5] Cao F M, Jin W Q, Huang Y W, *et al.* Review of underwater opto-electrical imaging technology and equipment (I): underwater laser range-gated imaging technology[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(2): 63-69.
曹峰梅, 金伟其, 黄有为, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(上): 水下激光距离选通技术[J]. *红外技术*, 2011, 33(2): 63-69.
- [6] Zhong W, Zhang X H, Guan F, *et al.* Underwater full range-gated imaging radar based on high-repetition-rate pulse laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1101009.
钟炜, 张晓晖, 管风, 等. 基于高重复频率脉冲激光的水下全选通成像雷达[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1101009.
- [7] Zhong W, Zhang X H, Han H W. Irradiance spatial distribution model of laser source for underwater range-gated imaging radar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0401005.
钟炜, 张晓晖, 韩宏伟. 水下距离选通成像雷达激光照明模型[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0401005.
- [8] You R R, Wang X W, Ren P D, *et al.* Target observation performance evaluation method for video surveillance based on Johnson criteria [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 276-281.
游瑞蓉, 王新伟, 任鹏道, 等. 约翰逊准则的视频监控目标检测性能评估方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(12): 276-281.
- [9] Liu Z S. Underwater image transmission and blurred image restoration[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(6): 1125-1131.
- [10] Ge W L, Hua L H, Zhang X H, *et al.* Signal to noise research in range-gated underwater laser imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2022-2026.
葛卫龙, 华良洪, 张晓晖, 等. 距离选通水下激光成像系统信噪比分析与计算[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 2022-2026.
- [11] Yan F, Yu Z J, Yu X, *et al.* Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(4): 709-713.
闫丰, 于子江, 于晓, 等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 709-713.
- [12] Zhou L W. On figure of merit of low light level image intensifiers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(4): 331-337.
周立伟. 关于微光像增强器的品质因数[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(4): 331-337.
- [13] Jaffe J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, 15(2): 101-111.
- [14] Jaffe J S, Dunn C. A model-based comparison of underwater imaging systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 1988, 925: 344-350.
- [15] Wu L, Shen Y, Li G P, *et al.* Modeling and simulation of range-gated underwater laser imaging systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7382: 73825B.
- [16] Bai T Z, Jin W Q. *Optoelectronic imaging principle and technology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 63-64.
白廷柱, 金伟其. *光电成像原理与技术* [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 63-64.
- [17] Jeong H S, Park H N, Kim J G, *et al.* Critical importance of the correction of contrast transfer function for transmission electron microscopy-mediated structural biology[J]. *Journal of Analytical Science and Technology*, 2013, 4(1): 14.
- [18] Brukilacchio T J. *A diffuse optical tomography system combined with X-ray mammography for improved breast cancer detection* [D]. Medford: Tufts University, 2003.