

水下距离选通成像系统调制传递函数模型分析

胡 玲¹, 王 霞^{1,2}, 延 波², 李帅帅¹

- (1. 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;
2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 随着国家对水下成像探测、水下资源勘查等应用需求增加, 建立符合实际情况的水下光电成像模型, 成为目前水下成像研究者的目标。为了探究水下距离选通成像系统性能, 建立了距离选通成像系统各个模块调制传递函数模型, 以及总的系统调制传递函数模型。对目前市场上主流成像系统所采用的超第二代、第三代像增强器的选通成像性能进行理论对比仿真分析, 完成了对水下距离选通成像系统性能模型的仿真。结果表明, 前向散射光调制传递函数以及后向散射光调制传递函数随着探测距离以及选通时间的增加呈现逐渐下降趋势, 并且前向散射光调制传递函数下降的速度更快; 系统调制传递函数随着探测距离、选通时间和空间频率的增加而逐渐下降, 并且通过理论模型分析得到典型的第三代像管的性能比超第二代像管的性能在水下距离选通成像过程中更具优势。

关键词: 水下成像; 距离选通; 性能模型; 散射光调制传递函数

中图分类号: TN223 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3262-08

Analysis of underwater range-gated imaging system MTF

Hu Ling¹, Wang Xia^{1,2}, Yan Bo², Li Shuaishuai¹

- (1. Key Laboratory of Photo Electronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Science and Technology on Low-light-level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

Abstract: As great attention has been paid to the application requirements of the underwater imaging detection nation wide, underwater resources exploration and so on, it has been the target of the underwater imaging researchers to set up suitable underwater photoelectric imaging model. The corresponding modulation transfer function(MTF) and total system MTF model were established to explore underwater range-gated imaging system performance. Through the use of underwater laser range-gated imaging prediction model and programs, the imaging performance of the present market adopted super second generation and generation III intensifiers were analyzed in comparison. Results indicate that the forward scattering light MTF and backscattering light MTF show a trend of gradual decline when detection range or gating time is increasing. The forward scattering light MTF declined faster. What's more, system MTF shows a trend of gradual decline when detection range, special frequency or gating time is increasing. Generation III intensifier has more advantages than super second generation intensifier.

Key words: underwater imaging; range-gated; performance-model; scattering light MTF

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-10

基金项目: 微光技术实验室科研基金(J20130502)

作者简介: 胡玲(1989-), 女, 硕士生, 主要从事光电图像处理仿真方面的研究。Email: hu260575@163.com

导师简介: 王霞(1972-), 女, 副教授, 博士生导师, 主要从事光电检测技术、光电成像技术等方面的教学和科研。

Email: angelniuniu@bit.edu.cn

0 引 言

水下距离选通成像技术是一种直接探测技术^[1],能够有效地消除海水的后向散射以及增加水下光电成像系统的作用距离等。成像清晰、对比度高,受环境光源影响小。它主要利用脉冲激光强度高、方向性好和脉冲宽度窄的特点,从时间的角度将目标反射光和后向散射光分离开来。国外比较典型的水下距离选通成像系统如加拿大国防研究与发展署的 LUCIE 系列^[2]、瑞典的国防研究所的 Aqua Lynx 以及新加坡南洋理工大学的 ULIS 系统等设备^[3]都已经获得有效应用;国内有钟森城^[4]等研制的激光照明水下目标距离选通成像系统、张毅^[5]等研究的利用循环步进式选通延时控制水下三维成像以及北京理工大学金伟其、黄有为^[6]等研发的水下距离成像系统。然而,如何全面系统地建立一个完整的水下距离选通成像系统的性能模型,国内外研究不多。因此,文中基于以上背景,在选通成像的工作原理下,研究水下距离选通成像系统性能并建立调制传递函数模型,通过 Matlab 对其进行仿真。分析超二代、三代像增强器在水下距离选通成像中的适用性,为进一步消除后向散射,设计、研制更高性能的水下距离选通成像系统奠定理论和技术基础。

1 水下距离选通成像系统结构

一个完整的距离选通成像系统主要包括大功率脉冲激光器、选通型 ICCD 及其同步控制电源等。距离选通成像技术原理图如图 1 所示。当其开始工作时,由脉冲激光器发出脉冲信号,脉冲向前行进直至遇到目标后被反射回去,该过程选通门关闭(减少杂散光进入 ICCD)。当反射光到达 ICCD,选通门开启。显然,如果 ICCD 选通门足够窄,则只有目标附近的光子可以被探测,返回信号的 SNR 将得到明显提高。

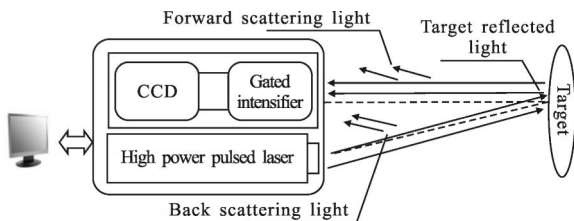


图 1 水下距离选通成像技术原理图
Fig.1 Underwater range-gated imaging technology

通常对水下距离选通成像系统性能的描述可从以下两方面进行考虑。一方面来自系统本身的组成,即系统本身因素包括光学镜头、ICCD 和显示器等因素;另一方面受到水体前向散射以及后向散射的影响。因此在水下距离选通成像系统性能评价过程中,采用系统收发系统与水体影响相结合的方式,使得性能评价结果更为准确。整体结构框图如图 2 所示,根据成像系统工作流程,可把整个过程分为两个大的模块,分别为:收发系统影响模块和水体影响模块。收发系统影响模块的主要组成部分为光学系统模块、ICCD 成像模块以及电子线路模块等。水体影响模块主要包括前向散射模块以及后向散射模块。因此仿真过程中应该分模块建立性能仿真模型。

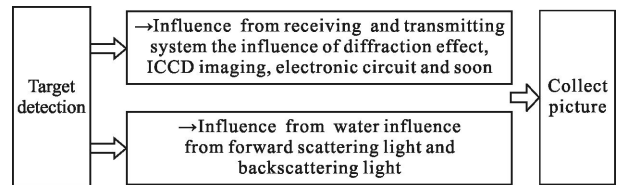


图 2 整体系统结构框图
Fig.2 System structure diagram

水下激光系统可以近似为线性系统,于是,整个系统传递函数可认为是收发系统以及水体的传递函数的乘积。则系统的传递函数可以表述为:

$$MTF_{total} = MTF_{device} \cdot MTF_{water} \tag{1}$$

2 水下距离选通成像系统性能模型

2.1 收发系统调制传递函数模型

对整个发射和接收系统而言,它们的调制传递函数主要受到光学透镜和像增强型 ICCD 的影响^[7]。可由下式表示:

$$MTF_{device} = MTF_{optics} \cdot MTF_{ICCD} \tag{2}$$

众所周知,即使是理想的光学系统,仍然会产生衍射效应,形成中央为亮斑的一系列同心圆环,对于圆孔径光学系统,衍射受限 MTF^[8]可表示为:

$$MTF_{optics} = \frac{2}{\pi} \cdot \left\{ \arccos \frac{f}{f_d} - \frac{f}{f_d} \left[1 - \left(\frac{f}{f_d} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \tag{3}$$

对于整个水下距离选通成像系统,其核心器件为 ICCD,主要由像增强器、锥形光纤束及 CCD 组成。于是,得到 MTF_{ICCD}:

$$MTF_{ICCD} = MTF_{intensifier} \cdot MTF_{of} \cdot MTF_{CCD} =$$

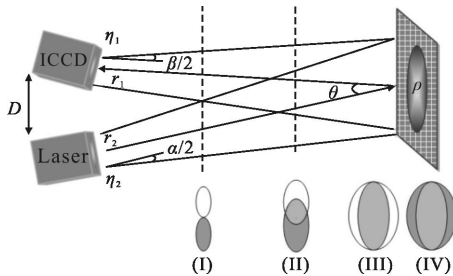
$$\exp\left(-\frac{f}{f_c}\right)^n \left(\frac{2J_n(D_1\pi f)}{D_1\pi f}\right)^2 \frac{\sin(\omega\alpha\pi f)}{\omega\alpha\pi f} \quad (4)$$

式中： J_n 为一阶贝塞耳函数； D_1 为光纤的中心距； f 为空间频率； f_c 为空间频率常数； ω 为 CCD 像元的线尺寸； α 为填充因子。于是收发系统的调制传递函数可由下式表示：

$$\text{MTF}_{\text{device}} = \frac{2}{\pi} \cdot \left\{ \arccos \frac{f}{f_d} - \frac{f}{f_d} \left[1 - \left(\frac{f}{f_d} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \cdot \exp\left(-\frac{f}{f_c}\right)^n \left(\frac{2J_n(D_1\pi f)}{D_1\pi f}\right)^2 \frac{\sin(\omega\alpha\pi f)}{\omega\alpha\pi f} \quad (5)$$

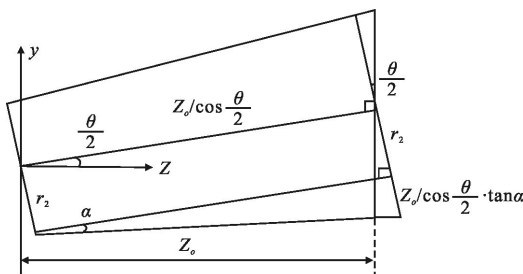
2.2 水体散射模型

如图 3 所示，其为一个典型水下距离选通成像系统工作的示意图。其中 a 为高功率脉冲激光器(前置扩束镜头)发射光束的发散角， β 为接收系统的接收视场角， θ 为发射中心轴与接收中心轴的夹角。接收光学系统的半径为 r_1 ，发射光学系统的半径为 r_2 。 D 为发射光学系统和接收光学系统之间的距离。由于脉冲激光器发射光束中心轴与 ICCD 接收光束中心轴均与水平线有一个微小夹角，故其在垂直截面上形成的应该是近似椭圆形状。



(a) 简单系统性能参数

(a) Simple system performance parameters



(b) 部分外激光成像关系

(b) Imaging relationship of laser light out section

图 3 水下选通成像系统中的参数应用

Fig.3 Parameters application of underwater range-gated imaging system

令两中心轴线的平分线是水平的，那么发射信号与接收信号的截面大致有四种情况：相离、相切、相交和包含，图(a)中(I)、(III)和(IV)所示情况为临界状态。在(I)的情况下，目标反射信号完全不能被 ICCD 接收；在(II)的情况下，部分目标反射信号能进入接收端；在(III)的情况下，ICCD 接收面积大于目标反射信号面积，能完全接收激光器所发信号，并且含有周围杂散光的干扰；在(IV)的情况下，ICCD 能完全接收激光器所发信号。

文中将主要围绕第(II)种普遍情况展开研究。

假设激光强度分布均匀， ϕ 为激光单脉冲能量，则其发射的激光脉冲功率 P_0 可近似如下：

$$P_0 = \frac{\phi}{\tau_p} \cdot \text{rect}\left[\frac{1}{\tau_p}\left(t + \frac{\tau_p}{2}\right)\right] \quad (6)$$

式中： t 为时间； τ_p 为脉冲宽度； k 为总衰减系数。假设 ICCD 与激光器为对称位置放置； η_0 为发射系统的工作效率。在距离 z 处激光的照射面积为 $s_0(z)$ ，则此处水体所受的激光照度为：

$$E_0(z) = \frac{P_0 \eta_0}{s_0(z)} \exp\left(-\frac{k \cdot z}{\cos \frac{\theta}{2}}\right) \approx 4 \frac{\cos^2 \frac{\theta}{2} \eta_0 \phi}{\pi \alpha^2 z^2 \tau_p} \cdot \exp\left(-\frac{k \cdot z}{\cos \frac{\theta}{2}}\right) \text{rect}\left[\frac{1}{\tau_p}\left(t + \frac{\tau_p}{2}\right)\right] \quad (7)$$

$$E_0(z) = \frac{P_0 \eta_0}{s_0(z)} \exp\left(-\frac{k \cdot z}{\cos \frac{\theta}{2}}\right) \approx 4 \frac{\cos^2 \frac{\theta}{2} \eta_0}{\pi \alpha^2 z^2} \cdot \exp\left(-\frac{k \cdot z}{\cos \frac{\theta}{2}}\right) P_0 \quad (8)$$

式中： $s_0(z) = \Omega_{\text{laser}} \cdot (z/\cos(\theta/2))^2$ ， Ω_{laser} 为脉冲激光束立体角， $\Omega_{\text{laser}} = \pi \sin^2(\alpha/2) \approx \frac{\pi}{4} \alpha^2$ 。

2.2.1 前向散射调制传递函数模型

蒙特卡罗分析技术在水下探测中已经得到广泛应用，但是该技术需要大量的运算。为了克服在前向散射中遇到的诸类困难，Wells 运算方法在前向散射光调制传递函数模型中较常使用^[9-10]。在前向散射光具有围绕非散射光的圆对称性和小角度近似的条件下，有如下关系：

$$\text{MTF}_{\text{forward}}(\psi, z) = \exp[-D(\psi)z] \quad (9)$$

$$D(\psi) = 2\pi \int_0^{\delta_{\text{max}}} \text{VSF}(\delta) \delta d\delta - 2\pi \cdot$$

$$\int_0^{\delta_{\max}} \left[\int_0^{\delta_{\max}} \text{VSF}(\delta) d\delta \right] J_0(2\pi\psi\delta) d\delta \quad (10)$$

式中: ψ 为空间角频率; $J_0(2\pi\psi\delta)$ 为零阶贝塞耳函数; δ 为光子流方向的角度; δ_{\max} 为最大积分角, 通常为接收系统视场角的一半, 即 $\beta/2$ 。 $D(\psi)$ 为频率衰减函数。激光从激光器出到从 z 处返回接收系统的时间可根据下式计算:

$$z = \frac{1}{2} \cos \frac{\theta}{2} v \cdot t \quad (11)$$

将 z 写成关于 t 的函数, 于是得到:

$$\text{MTF}_{\text{forward}}(\psi, t) = \exp \left[-\frac{1}{2} \cos \frac{\theta}{2} \pi \left(\int_0^{\delta_{\max}} P_0^2 \cdot \text{VSF}(\delta) d\delta - 2 \int_0^{\delta_{\max}} \left[\int_0^{\delta_{\max}} \text{VSF}(\delta) d\delta \right] J_0(2\pi\psi\delta) d\delta \cdot vt \right) \right] \quad (12)$$

2.2.2 后向散射调制传递函数模型

后向散射光的 MTF_{back} 可由调制传递函数定义求得, 为:

$$\text{MTF}_{\text{back}} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad (13)$$

式中: L_{\max} 与 L_{\min} 分别为接收系统接收到的最大亮度信号以及最小亮度信号。设目标是均匀漫反射物体, 根据《海洋光学》^[11] 书中所述的关系 $L = E/\pi$, 由于光照度和光强成正比关系, 可得:

$$\text{MTF}_{\text{back}} = \frac{I_{\text{target}}(z)}{I_{\text{target}}(z) + 2I_{\text{back}}(z)} \quad (14)$$

式中: $I_{\text{target}}(z)$ 为目标辐射强度; $I_{\text{back}}(z)$ 为接收器与目标之间的后向散射光的辐射强度。散射面积上的面积元 ds 与照明厚度 dz 的乘积即为散射体积 dv , 由体积元 dv 产生的后向散射光强度^[12]为:

$$dI(z) = \beta(\pi) \cdot E_0(z) dv = \beta(\pi) \cdot \frac{4\cos^2 \frac{\theta}{2}}{\pi\alpha^2 z^2} P_0 \eta_0 \cdot$$

$$\text{MTF}_{\text{back}} = \frac{\rho e^{-cz/\cos(\theta/2)} \cdot \frac{\phi}{\pi/4 \cdot \alpha^2 \tau_p f(z)} \text{rect} \left[\frac{1}{\tau_p} \left(t + \frac{\tau_p}{2} \right) \right]}{\rho e^{-cz/\cos(\theta/2)} \cdot \frac{\phi}{\pi/4 \cdot \alpha^2 \tau_p f(z)} \text{rect} \left[\frac{1}{\tau_p} \left(t + \frac{\tau_p}{2} \right) \right] + 8s_0(z) f(z) \beta(\pi) \cos^2 \frac{\theta}{2} \eta_0 P_0 \int_{z_1}^{z_2} \exp \left(-2k \cdot z / \cos \frac{\theta}{2} \right) \cdot \frac{1}{\pi\alpha^2 z^2} dz} \quad (21)$$

z 和 t 之间存在的函数关系, 可将后向散射光调制传递函数写成关于 t 的函数, 其形式如下所示:

$$\text{MTF}_{\text{back}} = \frac{\rho e^{-0.11ct/\cos(\theta/2)} \cdot \frac{\phi}{\pi/4 \cdot \alpha^2 \tau_p f(t)} \text{rect} \left[\frac{1}{\tau_p} \left(t + \frac{\tau_p}{2} \right) \right]}{\rho e^{-0.11ct/\cos(\theta/2)} \cdot \frac{\phi}{\pi/4 \cdot \alpha^2 \tau_p f(t)} \text{rect} \left[\frac{1}{\tau_p} \left(t + \frac{\tau_p}{2} \right) \right] + 8s_0(t) f(t) \beta(\pi) \cos^2 \frac{\theta}{2} \eta_0 P_0 \int_{t_1}^{t_1+\tau_p} \exp \left(-0.22kt/\cos \frac{\theta}{2} \right) \cdot \frac{1}{0.11\pi\alpha^2 t^2} dt} \quad (22)$$

$$\exp \left(-\frac{k \cdot z}{\cos \frac{\theta}{2}} \right) ds dz \quad (15)$$

式中: $\beta(\pi)$ 为水体散射相函数。则从位置 z_1 处到 z_2 处, 水体总体积产生的后向散射到达接收系统的总辐射强度可由下式表示:

$$I_{\text{back}}(z_1, z_2) = \iint \exp \left(-k \cdot z / \cos \frac{\theta}{2} \right) \beta(\pi) \cdot 4 \frac{\cos^2 \frac{\theta}{2}}{\pi\alpha^2 z^2} \cdot \exp \left(-\frac{k \cdot z}{\cos \frac{\theta}{2}} \right) P_0 ds dz \quad (16)$$

假设后向散射光辐射强度在面元上是分布均匀的, 重叠系数 $f(z)$ ^[13] 是进入接收视场的被照面积与激光照射面积之比, 那么水体后向散射照度可表示为:

$$I_{\text{back}}(z_1, z_2) = 4s_0(z) f(z) \beta(\pi) \cos^2 \frac{\theta}{2} \eta_0 P_0 \cdot \int_{z_1}^{z_2} \exp \left(-2k \cdot z / \cos \frac{\theta}{2} \right) \cdot \frac{1}{\pi\alpha^2 z^2} dz \quad (17)$$

通过选通时间和探测距离之间的关系, 将 z 写成 t 的函数, 于是得到:

$$I_{\text{back}}(t_1, t_1 + \tau_p) = 4s_0(z) f(z) \beta(\pi) \cos^2 \frac{\theta}{2} \eta_0 P_0 \cdot \int_{t_1}^{t_1+\tau_p} \exp \left(-0.22kt/\cos \frac{\theta}{2} \right) \cdot \frac{1}{0.11\pi\alpha^2 t^2} dt \quad (18)$$

脉冲光从目标反射回 ICCD 接收系统的过程中, ρ 为目标反射率, c 为辐照度衰减系数, 根据双流辐射传递理论, 能得到目标反射光的强度为:

$$I_{\text{target}} = \rho e^{-cz/\cos(\theta/2)} I_0 = \rho e^{-cz/\cos(\theta/2)} P / \Omega = \rho e^{-cz/\cos(\theta/2)} \cdot \frac{\phi}{\pi/4 \cdot \alpha^2 \tau_p f(z)} \text{rect} \left[\frac{1}{\tau_p} \left(t + \frac{\tau_p}{2} \right) \right] \quad (19)$$

$$I_{\text{target}} = \rho e^{-0.11ct/\cos(\theta/2)} \cdot \frac{\phi}{\pi/4 \cdot \alpha^2 \tau_p f(z)} \text{rect} \left[\frac{1}{\tau_p} \left(t + \frac{\tau_p}{2} \right) \right] \quad (20)$$

通过以上分析, 能得到如下所示的后向散射光的调制传递函数模型:

就是水下激光探测系统在 t_1 时刻接收到的水体后向散射光调制传递函数的表达式。

2.3 水下距离选通成像系统调制传递函数模型

对于成像器件来说,一般其 MTF 是由各部分 MTF 相乘得到的,包括镜头、像增强器 CCD,但由于在不考虑散焦的情况下,像增强器是限制成像器件分辨率的瓶颈,因此这里用像增强器的 MTF 与常数 $m(m \leq 1)$ 的乘积来代表整个系统成像器件的 MTF。对于水下成像而言,当脉冲激光器发出脉冲信号,光在水中迅速

传输,在此过程中受到水介质吸收和散射的影响,并且受到前向散射光以及后向散射光的影响,最终得到脉冲信号。水下距离选通成像系统可近似为线性系统,水体对 MTF 影响 MTF_{water} 就可以认为是前向散射光 $MTF_{forward}$ 和后向散射光的 MTF_{back} 的乘积,即:

$$MTF_{water} = MTF_{forward} \cdot MTF_{back} \quad (23)$$

$$MTF = m \cdot \exp\left(-\frac{f}{f_c}\right)^n \exp[-D(\psi)z] \frac{I_{target}(z)}{I_{target}(z) + 2I_{back}(z)} \quad (24)$$

于是有:

$$MTF = \frac{m \cdot \exp\left(-\frac{f}{f_c}\right)^n \exp[-D(\psi)z] \rho e^{-0.11cz/\cos(\theta/2)} \cdot \frac{\phi}{\pi/4 \cdot \alpha^2 \tau_p f(t)} \text{rect}\left[\frac{1}{\tau_p}\left(t + \frac{\tau_p}{2}\right)\right]}{\rho e^{-0.11cz/\cos(\theta/2)} \cdot \frac{\phi}{\pi/4 \cdot \alpha^2 \tau_p f(t)} \text{rect}\left[\frac{1}{\tau_p}\left(t + \frac{\tau_p}{2}\right)\right] + 8s_0(t)f(t)\beta(\pi)\cos^2\frac{\theta}{2} \cdot \eta_0 P_0 \int_{t_1}^{t+\tau_p} \exp\left(-0.22kt/\cos\frac{\theta}{2}\right) \cdot \frac{1}{0.11\pi\alpha^2 t^2} dt} \quad (25)$$

3 水下距离选通成像系统仿真分析

基于以上模型,可以对水下距离选通成像系统性能进行仿真分析。表 1 给出了一般海水的典型值。文中主要参考微光夜视公司的超二代像增强器、法国 Quantel 公司生产的 Brilliant 大功率主动调 Q 激光器,该激光器可通过 TTL 信号或者 RS232 接口进行外同步信号输入、Q 开关信号输入等功能。激光器的出射脉冲光的脉宽为 4 ns,单脉冲能量在出射 532 nm 波长激光时为 160 mJ。它的平均功率大概在 10 W 左右。此外,采用 PULNIX 公司的 M-300NIR 相机的相关参数进行仿真。

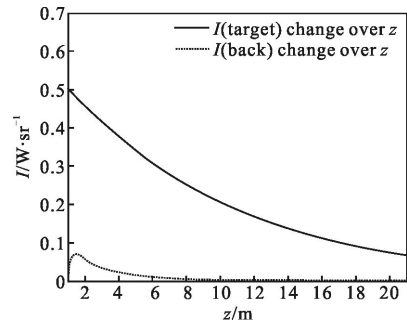
表 1 水下距离选通成像系统主要参数典型值

Tab.1 Typical values of underwater range gated imaging system main parameters

k/m^{-1}	c	P_0/W	$\beta(\pi)$	$r_1, r_2/m$	η_0	η_1	ρ
0.1	0.1	10	0.15	0.018	0.5	0.5	0.15
$\nu/m \cdot ns^{-1}$	θ/rad	m	VSF	α/rad	β/rad	T_{lens}	$f(z)$
0.3/1.33	0.2	0.75	$(1+(\cos\delta)^2) \cdot 10^{-4}$	2.0	4.0	0.5	0.85

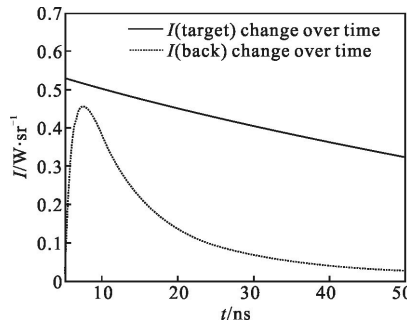
目标与背景强度随着探测距离以及时间变化的关系如图 4 所示。从图中能够看出,随着探测距离以及选通时间的增加,目标的辐射强度和背景的辐射强度大体上呈现下降趋势。究其原因,主要是因为当探测距离越远,选通时间增加,辐射能量损失越多,

噪声能量增加,故照度辐射强度出现如图 4 所示。



(a) 探测距离改变

(a) Change over detection range



(b) 选通时间改变

(b) Change over time

图 4 目标与背景强度随着探测距离以及时间变化的关系

Fig.4 Target and the background irradiance change over detection range and time

$MTF_{forward}$ 与 MTF_{back} 随探测距离与时间变化的关系如图 5 所示。随着探测距离以及选通时间的增加, $MTF_{forward}$ 呈现逐渐下降的趋势, MTF_{back} 则有一个缓

慢的上升过程之后再下降。并且 MTF_{back} 下降的速度比 $MTF_{forward}$ 慢一些。其原因是,随着探测距离的增加前向散射光的累积值增大,目标分辨能力下降,而其函数表现形式近似为 e 的负指数关系,这样就使得 $MTF_{forward}$ 随着探测距离和选通时间的增加而降低;而当探测距离以及选通时间增加时,目标的辐射强度与背景辐射强度相比,在 13 m 的作用距离内,其所占比重较大,之后背景辐射强度作用越来越明显,故导致该曲线先缓慢上升之后呈现下降趋势。

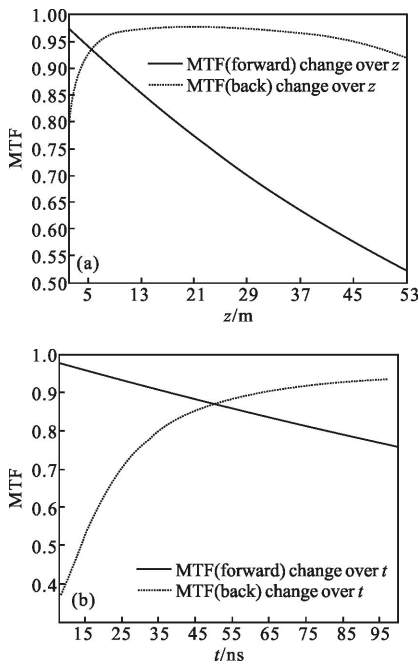


图 5 $MTF_{forward}$ 与 MTF_{back} 随探测距离与时间变化的关系

Fig.5 $MTF_{forward}$ and MTF_{back} change over detection range and time

综上所述,将探测距离以及选通时间控制在一定范围内,不仅能改善其目标辐射强度与背景辐射强度之间的关系,同时能将 $MTF_{forward}$ 与 MTF_{back} 的下降恒定在某一数值区间段内。

4 典型超第二代管和第三代管在水下距离选通成像系统中的性能对比

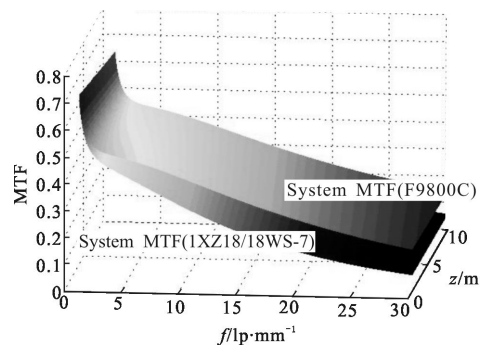
第三代像增强型 ICCD 由于其所用选通型像增强器采用了负电子亲和势光阴极,相对于超第二代像增强型 ICCD 灵敏度得到大幅提高。但是,超第二代像增强型 ICCD 工作电压比第三代低,故它们在选通成像中的表现需要经过仿真和实验进行验证。表 2 为超第二代和第三代像增强型 ICCD 光阴极性

能对比。文中主要采用北方夜视公司 1XZ18/18WS-7 像增强器和 ITT 公司的 F9800C 像增强器的性能参数作仿真对比,对两者进行理论对比分析。

表 2 1XZ18/18WS-7 和 F9800C 像管性能参数
 Tab.2 1XZ18/18WS-7 and F9800C intensifier performance parameters

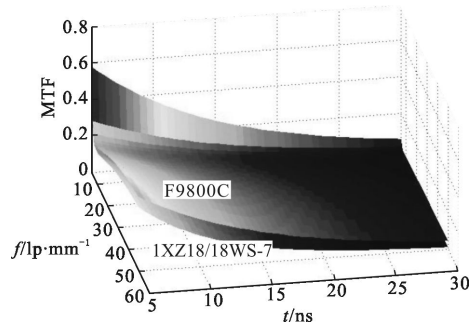
Model number	Photocathode luminous sensitivity / $\mu A \cdot lm^{-1}$	$f_c/lp \cdot mm^{-1}$	n	EBI/ μlx
1XZ18/18WS-7	500(2 850 K)	15	1.2	0.2
F9800C	1 800(2 856 K)	28	1.4	0.25

基于文中提出的理论模型,可以对水下距离选通成像系统性能通过编程进行仿真分析。如图 6 所示,不同像管下的距离选通成像系统 MTF 与探测距离、选通时间和空间频率有着密切的关系。从图中能够看出,当空间频率 $f=15 lp/mm$ 时,随着选通时间延长或者探测距离增加,系统 MTF 下降,并且采用 1XZ18/18WS-7 的系统 SNR 比采用 F9800C 的系统 SNR 下降速度更快。



(a) MTF 与空间频率、探测距离之间的关系

(a) MTF change over spatial frequency and detection range



(b) MTF 与空间频率、选通时间之间的关系

(b) MTF change over spatial frequency and time

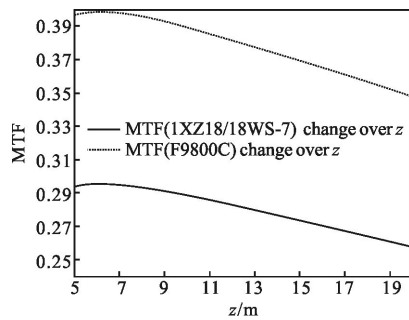
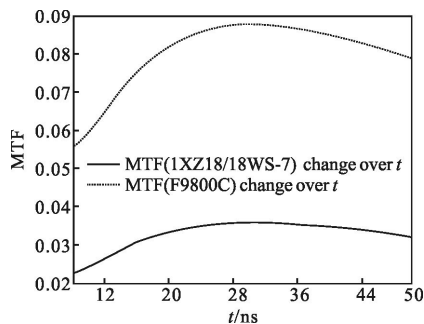
(c) MTF 与探测距离间的关系 ($f=15$ lp/mm)(c) $f=15$ lp/mm, MTF change over detection range(d) MTF 与选通时间之间的关系 ($f=15$ lp/mm)(d) $f=15$ lp/mm, MTF change over time

图6 不同像管下的距离选通成像系统 MTF 随各参数变化的关系
Fig.6 Range gated imaging system under different intensifier MTF change over each parameter

选取合适的探测距离、选通时间 t 以及较小的空间频率 f 有利于改善成像系统的成像质量, 提高目标探测性能和信噪比。采用一些方法和手段, 如增加激光功率、缩小接收系统的视场角, 能够减少背景散射光的不利影响。从仿真结果来看, 第三代像增强型 ICCD 的在水下距离选通成像系统中的性能相对超二代像增强型 ICCD 稍显优势。

5 结论

文中基于距离选通原理, 结合典型水下激光成像系统, 研究了像增强型 ICCD 对系统调制传递函数的影响。深入的探究了后向散射光强度、背景辐射强度等与时间和探测距离之间的关系, 从理论上推导各相关模块的调制传递函数模型, 通过层层分析并得到了系统的总的调制传递函数模型的近似函数表达式。采用海水的典型参数, 通过 Matlab 对该过程进行模拟仿真, 分析了空间频率 f 、选通时间 t 、探测距离 z 和系统 MTF 之间的相互关系。并且通过一定的参量对比分析了超二代像增强器以及第三代

像增强器在水下距离选通成像系统中的作用。该仿真过程表明, 选通时间 t 、空间频率 f 和探测距离 z 的增加都会使得系统的 SNR 和 MTF 降低; 第三代像增强器在水下距离选通成像过程中的表现优于超二代像增强器。文中模型适合于分析水下距离选通成像系统的信噪比以及探测距离等, 同时可以用于分析采用不同像增强器在水下成像过程中的性能。并且, 该仿真结果有助于为分析影响对比度降低的因素奠定基础, 同时为研究者用实验验证时提供理论基础。下一步的工作, 可以从成像噪声方面进行展开。

参考文献:

- [1] Wang Shouzheng, Sun Feng, Zhang Xin. Development of laser illuminating rangegated imaging technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 95-99. (in Chinese)
- [2] Fournier G R, Bonnier D, Forand L, et al. LUCIE ROV mounted laser imaging system[C]//SPIE, 1992, 1750: 443-452.
- [3] Adam Andersson. Range gated viewing with underwater camera[D]. Linköping: Linköping University, 2005.
- [4] Wang Rongbo, Zhong Sencheng, Li Zeren, et al. Development of underwater range-gated imaging system based on laser illumination [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(7): 1666-1771. (in Chinese)
- [5] Zhang Yi, Bai Lianfa, Chen Qian, et al. Circular step advance delay gate-ranged underwater 3D imaging [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Nature Science)*, 2007, 31(6): 753-758. (in Chinese)
- [6] Huang Youwei, Jin Weiqi, Wang Xia, et al. Theoretical optical backscattering model for staring underwater laser imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(7): 1191-1197. (in Chinese)
- [7] Wang Xiaofeng, Liu Yang, Xu Dekun. Modeling and simulation analysis of ICCD camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(6): 560-563. (in Chinese)
- [8] Pan Minghua, Wen Xiangwen, Zhu Guoli. Design of combination measurement system for pitching angles [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 598-604. (in Chinese)
- [9] Shi Jifang, Yang Bing, Han Zhansuo. Objective evaluation of resolution for low-light-level image intensifier based on dual-model [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(9): 2260-2265. (in Chinese)

- [10] Zhao Yan, Zhai Baichen, Wang Jianli, et al. Design and implementation of the laser range-gated imaging synchronization controlsystem [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 526–529. (in Chinese)
- [11] Jlov N G. Oceanic Optics [M]. Beijing: Science Press, 1981. (in Chinese)
- [12] Pang Chunying, Zhang Wao. Signal-to-noise ratio model of laser active imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(2): 319–324. (in Chinese)
- [13] Mishra R K. Airborne electro-optical sensor performance predictions and design considerations [C]//SPIE, Acquisition, Tracking, and Pointing(V), 1991, 1482: 138–145.