

文章编号: 0253-2239(2010)11-3177-07

水下激光距离选通成像与脉冲展宽的时序模型

黄有为 王霞* 金伟其 丁琨 李海兰 刘敬

(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)

摘要 基于距离选通原理,深入分析了水下脉冲传输和探测器选通接收间的时序关系,建立了较为完善的距离选通时序模型;基于搭建的水下脉冲激光距离选通实验平台,设计了专门的模型验证实验。实验与仿真结果的一致性表明:模型能较好地描述水下距离选通成像过程,预测成像对比度随延迟时间的变化,可用于实际选通系统的性能预测和优化设计。此外,还借助模型讨论了各参量对成像对比度的影响,并介绍了利用距离选通技术直接测量水下脉冲时间展宽的方法。

关键词 光电子学;水下成像;激光成像;距离选通;脉冲时间展宽

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3177

Temporal Model of Underwater Laser Range-Gated Imaging and Pulse Stretching

Huang Youwei Wang Xia Jin Weiqi Ding Kun Li Hailan Liu Jing

(Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract On the basis of range-gated technology, the temporal relation between laser pulse propagation and gated reception was analyzed, and an integrated underwater range-gated temporal model was proposed. The model was validated via specially designed experiments which were carried out on a home-built underwater laser range-gated platform. The good agreements between the experiments and simulations confirm that the model can predict the variations of image contrasts versus delay time, and can be applied to the performance prediction and optimal design of real systems. Furthermore, the effects of the various parameters on the image contrasts versus delay time were discussed, and the measurement of pulse temporal stretching based directly on range-gated technology was also introduced.

Key words optoelectronics; underwater imaging; laser imaging; range-gated; pulse temporal stretching

1 引言

光电成像探测技术作为当前迅速发展水下成像探测手段之一,具有成像分辨率高、图像自然直观以及与人眼视觉一致等特点。由于水体对光辐射的强烈衰减,使得一定深度的水下世界处于黑暗之中。因此,基于主动照明的水下光电成像技术成为深水(海)光电成像探测的主要模式。在以吸收为主的清澈海水中,通

过提高照明光功率或选用更灵敏的探测器,能有效提升探测距离。但当水质变得浑浊,由微粒散射引起的后向和前向散射光进入探测器,将迅速降低成像对比度和分辨率。距离选通成像技术^[1]利用照射路径上水体散射光与目标反射光到达探测器的时刻差异,有选择地接收目标反射光,而滤除水体后向散射光,可提升浑浊水质条件下的探测距离和成像对比度。目前,水

收稿日期: 2009-12-23; 收到修改稿日期: 2010-03-26

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z207)资助课题。

作者简介: 黄有为(1983—),男,博士研究生,主要从事水下激光成像及其图像处理技术等方面的研究。

E-mail: fronter@bit.edu.cn

导师简介: 金伟其(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事微光与红外技术、光电图像处理、光电检测技术等方面的研究。E-mail: jinwq@bit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: angleniuniu@bit.edu.cn

下激光距离选通成像装置已在国外深海载人运载器、水下遥控运载器和自治机器人等设备中获得有效应用,而如何提高水下光电成像系统性能(作用距离和细节分辨能力等)一直是国内外学者研究的重要课题^[2~8]。国内有张毅等^[9]研究了利用循环步进式选通延时控制实现水下三维成像;柏连发等^[10]研究了距离选通成像过程中选通控制器与选通像增强器直接电连接时的干扰问题;孙健等^[11]研究了选通门控信号对水下成像质量的影响。然而,在激光脉冲时空展宽、探测器选通门宽及延时控制如何影响选通范围和接收光功率方面,国内外研究得还较少。本文将基于距离选通成像原理,通过分析脉冲宽度、选通门宽和延迟时间的关系,研究不同时间内接收回波所对应的散射区域及其有效散射功率,并通过实验对模型进行验证。

2 距离选通时序模型

典型距离选通成像系统的基本组成包括脉冲激光器、选通探测器和时序控制器。图 1 为距离选通成像技术的原理图。通常为缩小系统总体尺寸,往往将激光器和选通探测器置于同侧且贴得很近。激光器在 $T_0 = 0$ 时刻向外发射一束脉冲,在 T_1 时刻照射到目标。设目标距离足够远,包含目标信息的反射光将在 T_2 时刻返回选通探测器,且有 $T_2 \approx 2T_1$ 。在传输过程中,部分脉冲光受介质散射偏离原来传输方向,其中前向或后向散射光直接影响成像。控制器在目标反射光返回之前始终让选通探测器保持关闭状态,从而可滤除绝大部分水体后向散射光,提高成像对比度。研究距离选通成像过程需要深入分析脉冲激光传输和探测器选通接收间的关系,确定选通接收的水体范围和散射光强度。

如图 2 所示,设脉冲激光初始脉宽为 $T_p(0)$,全部脉冲经水下 $t = 0$ 至 $t = T_2$ 时刻往返传输后,回

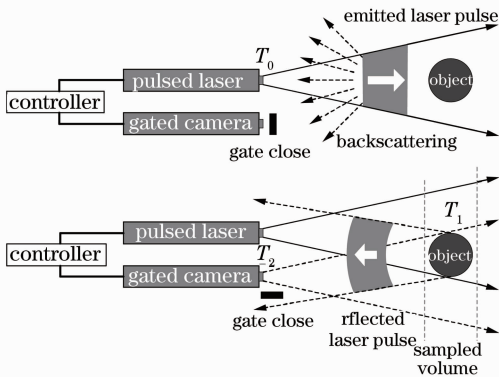


图 1 距离选通成像技术原理图

Fig. 1 Diagram of range-gated imaging technology

波脉宽展宽为 $T_p(T_2)$ 。设选通探测器相对激光出光时刻延迟 T_d 时间后打开,而后又持续开启了 T_g 时间。 T_d 和 T_g 分别称为距离选通系统的延迟时间和选通门宽。图中粗实线表示激光脉冲,带箭头的虚线表示光束传输路径。

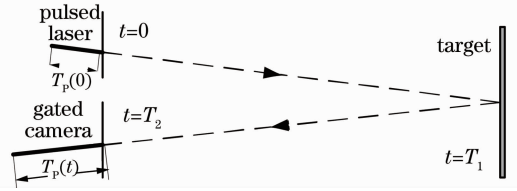


图 2 激光脉冲传输示意图

Fig. 2 Diagram of laser pulse propagation

在给定的 $T_p(0)$ 、 T_d 和 T_g 情况下,首先计算系统选通接收的散射水体范围。图 3 (其中带箭头的点划线为时间轴,时间起点定义在激光出光时刻)给出了选通接收的两种极限情况,其中 $2t_{down}$ 和 $2t_{up}$ 分别表示激光脉冲前沿经 $v_w t_{down}$ 和 $v_w t_{up}$ (v_w 为水中光速)距离处单位水体截面散射后返回探测器的时刻。当脉冲前沿在 $2t_{up}$ 时刻返回时,若探测器刚好经历了 T_d 延迟和 T_g 开启而重新返回关闭状态,即 $2t_{up} = T_d + T_g$,则探测器刚好无法接收到来自 $v_w t_{up}$ 处单位水体截面的后向散射光;同样,当脉冲后沿在 $2t_{down} + T_p(2t_{down})$ 时刻返回时,若探测器刚好经历过 T_d 延迟而正将由关闭变为开启状态,即 $2t_{down} + T_p(2t_{down}) = T_d$,则探测器也刚好无法接收到来自 $v_w t_{down}$ 处单位水体截面的后向散射光。因此,后向散射光能被探测器接收的散射水体范围 z 应满足不等式

$$v_w t_{down} = v_w \frac{T_d - T_p(2t_{down})}{2} \leq z \leq v_w t_{up} = v_w \frac{T_d + T_g}{2} = v_w t_{up}, \quad (1)$$

式中 t_{up} 和 t_{down} 分别为以传输时刻度量的散射水体范围的上下限。对于不透明目标面,一般假设其反射光强度远大于其后水体散射光的累积强度,可忽略目标面之后水体散射光影响。于是,有效散射水体范围 z 可再加入一个限制条件, $z \leq v_w T_1$ 。

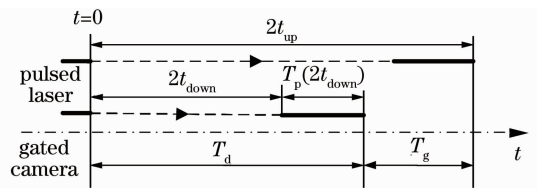


图 3 脉冲传输和选通接收的时序关系

Fig. 3 Temporal relation between pulse propagation and gated reception

虽然(1)式确定了能被探测器接收的散射水体范围,但该范围内某单位水体截面的后向散射脉冲回波能否被完整接收还与选通时序有关。因此,下面主要以某 $v_w t$ ($t_{down} \leq t \leq t_{up}$) 距离处单位水体截面为例,计算其后向散射脉冲回波中能被探测器接收的脉冲前点和后点时刻。

为便于理解,将(1)式的散射水体范围以距离 $v_w T_d/2$ 为界分成前后两段,分别计算各段内某 $v_w t$ 处单位水体截面对应的脉冲前点和后点时刻。此处, t' 表示以脉冲前沿为起点的脉冲自身持续时间点; t'_{front} 和 t'_{back} 分别表示所要计算的脉冲前点和后点时刻,且有 $t', t'_{front}, t'_{back} \in [0, T_p(2t)]$ 。

当满足 $v_w [T_d - T_p(2t)]/2 \leq v_w t \leq v_w T_d/2$ 时,图 4 中阴影区间给出了探测器能接收的有效脉冲回波区间。图 4 中脉冲前沿在 $2t$ 时刻返回探测器,此后又经历了一段时间,探测器才由延迟变为开启状态。因此,探测器无法接收到从脉冲前沿返回到探测器开启这段时间间隔内的脉冲功率,于是真正能被接收的脉冲前点时刻为 $t'_{front} = T_d - 2t$ 。当脉冲后沿返回探测器时,若探测器还处于开启状态,则脉冲后沿时刻 $T_p(2t)$ 即为实际接收的脉冲后点时刻 t'_{back} ;若探测器已处于关闭状态,则脉冲后点时刻为 $t'_{back} = T_d + T_g - 2t$ 。综合分析可得

$$\begin{aligned} t'_{front} &= T_d - 2t \\ t'_{back} &= \min\{T_p(2t), T_d + T_g - 2t\}, \end{aligned} \quad (2)$$

同理,当满足 $v_w T_d/2 \leq v_w t \leq v_w (T_d + T_g)/2$ 时(图 5),能被探测器接收的回波脉冲的前点和后点时刻为

$$\begin{aligned} t'_{front} &= 0 \\ t'_{back} &= \min\{T_p(2t), T_d + T_g - 2t\}. \end{aligned} \quad (3)$$

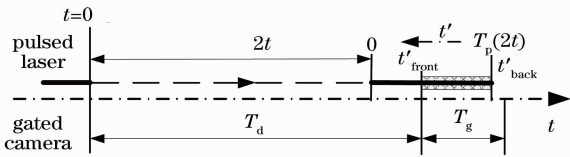


图 4 前段时序关系图

Fig. 4 Temporal diagram of the front fraction

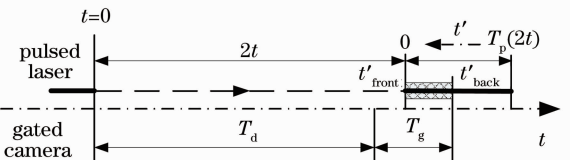


图 5 后段时序关系图

Fig. 5 Temporal diagram of the back fraction

综合(2)式和(3)式可得在(1)式指定的散射水体范围内,某 $v_w t$ 距离处单位水体截面后向散射脉冲回波中能被探测器接收的实际脉冲前点和后点时刻为

$$\begin{aligned} t'_{front} &= \max\{0, T_d - 2t\} \\ t'_{back} &= \min\{T_p(2t), T_d + T_g - 2t\}. \end{aligned} \quad (4)$$

设该单位水体截面后向散射脉冲回波的功率密度分布函数 $P_d(t, t')$ 已知或可测得,则此单位截面的后向散射脉冲中能被探测器接收的有效脉冲功率为

$$P(t) = \int_{t'_{front}}^{t'_{back}} P_d(t, t') dt'. \quad (5)$$

将 $P(t)$ 在(1)式指定的散射水体范围内积分,便可求得给定参量条件下探测器接收的累积散射光功率

$$P_{int} = \int_{v_w t'_{down}}^{v_w t'_{up}} P(t) dz = \int_{t'_{down}}^{t'_{up}} v_w P(t) dt, \quad (6)$$

进一步结合激光强度分布、水体散射和透镜成像模型^[12~14],依据探测器阵列计算接收的光功率,便可模拟得到距离选通成像的二维图像照度分布。

3 水下脉冲展宽及其测量方法

当光脉冲在水下传输时,其脉冲宽度会由于水体散射而逐渐展宽,借助距离选通技术能有效测量该展宽量。设目标面位置固定,其反射光前沿返回探测器的时刻仍为 T_2 (图 2),且保持探测器 T_g 值不变。以目标面为参考面,通过改变 T_d ,分析探测器能接收到目标面反射光的 T_d 值范围。结合(1)式的推导可知,当 T_d 满足以下条件时:

$$T_d \geq T_2 + T_p(T_2) = T_d^{up}, \quad (7)$$

或

$$T_d \leq T_2 - T_g = T_d^{down}, \quad (8)$$

探测器将无法接收到目标面的反射光。即临界延迟时间 T_d^{up} 与 T_d^{down} 正好与选通成像中目标面刚出现和刚消失的 T_d 值相对应, $\Delta T_d = T_d^{up} - T_d^{down}$ 表示该过程中 T_d 的变化量。将(7),(8)式相减可得 T_2 时刻返回脉冲的脉宽

$$T_p(T_2) = \Delta T_d - T_g. \quad (9)$$

为确保 T_d 的变化范围能完整覆盖 T_d^{up} 和 T_d^{down} , 还需加入两个基本条件: $T_g \leq T_2$ 且 $T_d \geq T_p(T_2)$ 。其中 T_g 和 T_d 分别决定了脉宽测量的下限和上限, T_d 的控制精度决定了脉宽的测量精度。 T_g 越窄, T_d 的可调节范围越大,脉宽的可测量范围就越大; T_d 的控制精度越高,脉宽的测量精度就越高。

同理,在空气中近距离上(可忽略路径上的脉冲

展宽),按照相同的激光脉冲与选通成像门宽进行信号初始脉宽 $T_p(0)$ 测量,由此即可评价光脉冲在水下传输时的脉宽展宽量 $\Delta T_p = T_p(T_2) - T_p(0)$ 。

根据以上分析,按照某种测试评价指标(文中采用图像对比度),利用距离选通成像系统测得在某距离处目标面对应的 ΔT_d ,便可确定对应距离的脉宽展宽量。与采用光电倍增管或雪崩二极管等快速响应器件的测量方法相比,该方法基于实际成像探测过程,不易受激光光斑分布和探测器动态范围等因素限制;通过定量调整光圈、探测器增益及曝光时间等参量可避免点探测的不足;由于发射与接收装置位于同侧,避免了水下光轴对准等问题,测量起来更

加容易和灵活;测得的展宽量是多脉冲时间平均的结果,重复性和可靠性更高。此外,脉冲展宽量能直观和真实地反映实际成像探测过程,可直接应用于实际距离选通成像系统的性能评估和优化设计。

4 模型验证及讨论

4.1 距离选通模型验证

为检验距离选通时序模型的有效性,在实验室搭建的水下脉冲激光距离选通成像实验平台上,设计了专门的水下成像验证实验,以检验实际成像对比度随延迟时间 T_d 变化的规律及其与理论模型的一致性。实验器材如图 6 所示。



图 6 实验器材示意图。(a) 实验水道, (b) 激光器, (c) 选通接收器

Fig. 6 Schematic of experimental equipment. (a) Experimental pipeline, (b) laser, (c) gated receiver

实验在长 16 m、直径 0.40 m 的水道[图 6(a)]中进行,水道内壁涂有黑色防水消光材料,能有效降低管壁反射率;激光器[图 6(b)]采用法国 Quantel 公司 Brilliant 系列 Nd:YAG 大功率脉冲激光器,其单脉冲峰值功率为 160 mJ,脉宽为 6 ns;选通成像系统[图 6(c)]采用高性能超二代像增强器光学耦合 EMCCD 形式;EMCCD 采用 PI 公司的 Photo Max 512B,其曝光时间可控(可通过延长曝光时间来消除接收能量不足或系统噪声对成像的影响),动态范围可达 16 bit。实验采用黑白方形靶标(图 7),采集表征实际照度的图像灰度(216 级)进行对比度计算,图像对比度 C_t 定义为

$$C_t = (I_w - I_b) / (I_w + I_b), \quad (10)$$

式中 I_b 和 I_w 分别为图像中靶标黑白区域或其投影区域的平均灰度值。实验所用水质和系统参量列于表 1 中。 λ 、 Q 和 $T_p(0)$ 分别为激光器波长、单脉冲能量和初始脉冲宽度; n_{water} 、 c 、 ω_0 和 $\beta(\pi)$ 分别为水体折射率、水体衰减系数、单次散射率和平均后向散射系数; τ_{lens} 、 f 和 F 分别为接收物镜透过率、焦距和光圈数。 ϕ 为像管阴极面直径; α 为激光照明半视场角; d_0 为激光器与接收器中心间的距离; $V(532)$ 为 532 nm 对应的人眼视见函数; α_0 为激光器和接收器

中心光轴连线偏离水平方向的角度(图 8),该参量由实验器件结构决定,将影响光束在成像视场内靶标黑白区域及其投影区域上的照明均匀性; θ_0 为水体平均散射角。



图 7 黑白靶标

Fig. 7 Black and white target

表 1 水下激光距离选通成像参量

Table 1 Parameters of underwater laser range-gated imaging

Parameter	Value	Parameter	Value
λ / nm	532	φ / mm	18
Q / mJ	160	n_{water}	1.34
$T_p(0) / \text{ns}$	6	α / mrad	20
c / m^{-1}	0.604	ω_0	0.7
τ_{lens}	0.8	$V(532)$	0.88
f / mm	160	d_0 / mm	100
F	2	$\alpha_0 / (^{\circ})$	20
$\beta(\pi) / (10^{-3} \text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})$	5	θ_0 / mrad	50

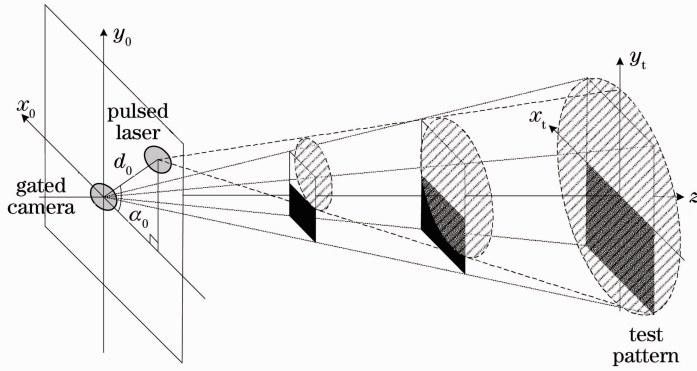


图 8 α_0 对成像对比度计算的影响

Fig. 8 Effect of α_0 on the computation of image contrasts

将靶标置于距窗口约 8.3 m 位置, 分别将 T_g 取为 5 ns 和 200 ns, 延迟时间 T_d 按 1 ns 步长递减 (考虑到电路和系统控制延迟影响, 应为相对延迟, 必要时可标定)。当 T_g 为 5 ns, 对应的水下往返光程约 1.12 m (即 $v_w T_g$)。即随着 T_d 的变化, 每次仅有沿传输方向约 0.56 m 范围内水体散射光被探测器接收。当 $T_g=200$ ns 时, 所覆盖的水体范围约为 22.4 m, 远大于目标距离(8.3 m)。此时随着 T_d 的减小, 将有越来越多的散射光被像面接收。

图 9, 10 分别给出两种 T_g 取值时, 图像对比度随 T_d 变化的实验和仿真曲线。由图可知, 无论 T_g 取得较窄或较宽, 对比度变化的理论和实验结果都具有较好的一致性, 表明模型能较好描述水下距离选通成像过程。

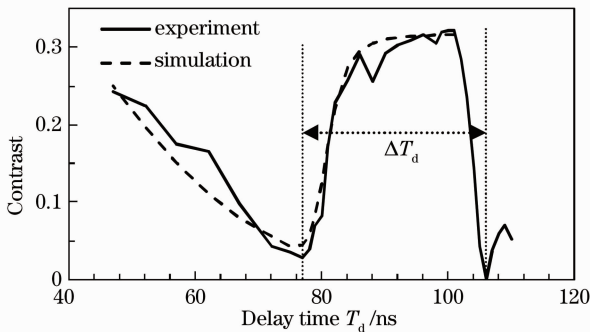


图 9 $T_g=5$ ns 时成像对比度随 T_d 的变化曲线

Fig. 9 Curves of image contrast versus T_d for $T_g=5$ ns

由图 9 中实验对比度曲线可得 $\Delta T_d \approx 106$ ns - 76 ns = 30 ns, 由(9)式算得信号脉宽 $T_p(T_2) = 30$ ns - 5 ns = 25 ns。同理, 在空气中测得的平均脉冲宽度为 20 ns, 于是当前实验条件下的脉冲展宽量为 25 ns - 20 ns = 5 ns。这与按 Stotts 提出的脉宽展宽模型^[15]在相同参量下算得的展宽量(约 4.72 ns)基本一致, 也与章正宇等^[16]实验结果相当。此外, 图 9 中成像对比度

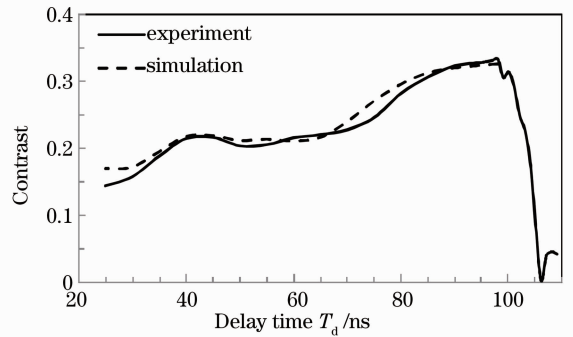


图 10 $T_g=200$ ns 时成像对比度随 T_d 的变化曲线

Fig. 10 Curves of image contrast versus T_d for $T_g=200$ ns 极小值点对应的 T_d 值(约为 76 ns)与靶标真正消失时对应的 T_d 值间的偏差是测量误差产生的原因之一。

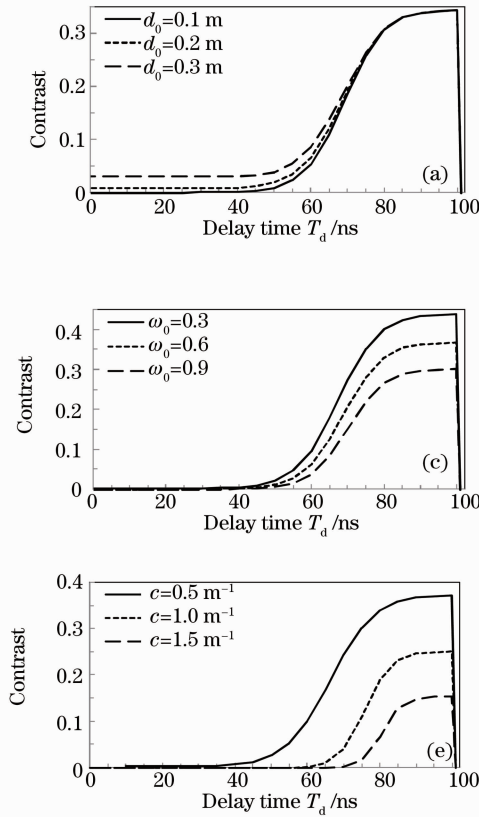
4.2 讨论

在验证了距离选通时序模型的有效性之后, 可进一步借助模型仿真分析系统参量和实验水质对成像对比度的影响。首先设 $\alpha_0 = 0$, 使照明光束在成像视场内始终对称地照射到靶标及其投影的黑白区域内, 以消除照明不均匀导致的成像对比度起伏; 取 $T_g = 200$ ns, 以便讨论水体后向散射光对成像的影响。图 11 分别给出了 $d_0, \beta(\pi), \omega_0, T_p(0), c$ 和 α 取不同值时(参量定义于表 1 中), 选通成像对比度随 T_d 的变化曲线。由图可以看出:

- 1) 激光器与接收器间距 d_0 主要影响非选通情况下的图像对比度, 对选通成像时的对比度影响很小, 即距离选通成像系统允许激光器和接收器有较近的间距;
- 2) 水质越恶化, 即水体的衰减系数 ω_0 、单次散射率 c 和后向散射系数 $\beta(\pi)$ 越大, 随着 T_d 的减小, 图像对比度下降越迅速, 即对靶标成像的影响越显著;
- 3) 激光脉冲宽度 $T_p(0)$ 越小, 随着 T_d 的减小, 图像对比度下降越迅速。由于 $T_p(0)$ 决定了有效水

体散射范围及单位水体截面散射脉冲的利用率,因此 $T_p(0)$ 越小,则相同范围内水体后向散射的平均脉冲利用率越高,即探测器接收到的水体后向散射强度越大,靶标成像对比度下降越快;

4) 在不考虑接收器最低探测灵敏度的条件下,



激光发散角 α 对成像对比度的影响较小;

5) 随着 T_d 的减小, α_0 主要影响成像对比度下降的速率及其变化趋势。一方面造成图 11 中对比度曲线相比图 10 下降迅速;另一方面也造成图 9 中当 $T_d < 76$ ns 时, T_d 越小,对比度反而越大。

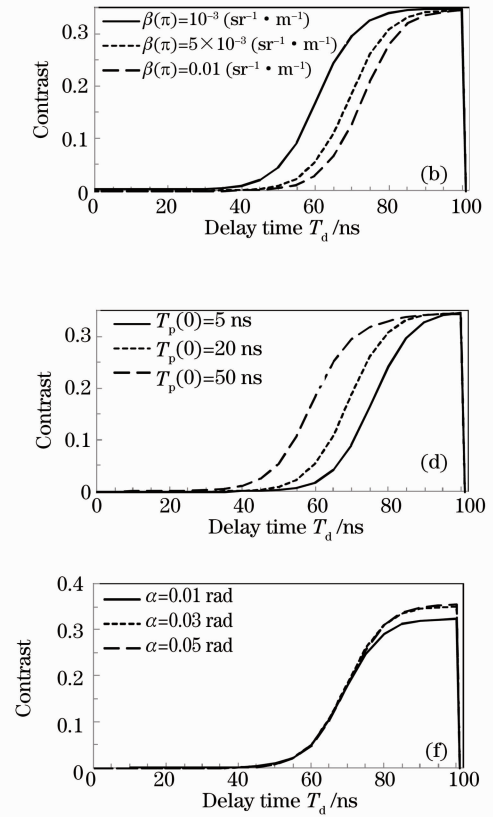


图 11 各参量对成像对比度随 T_d 变化的影响

Fig. 11 Effects of the various parameters on image contrast versus T_d

为进一步分析上述对比度变化过程,首先设 T_d 的初始值很大,而后由大到小调整 T_d 。当目标刚出现时,将对应的 T_d 值定义为延迟起点,继续不断减小 T_d ,当靶标成像对比度降至 5% 以下时,将此时 T_d 相对延迟起点的变化量记为 ΔT 。图 12 给出表 1 参量条件下计算所得 ΔT 随 $d_0, \beta(\pi), c$ 参量的变化曲线,纵坐标 ΔT 越大,则相同阈值成像对比度下探测器所

能容许的水体后向散射光接收范围就越宽。由图可知, d_0 越小, $\beta(\pi)$ 和 c 越大时,单位长度上的水体散射强度越显著,探测器能容许的水体散射光接收范围就越窄。该结果将不仅有助于弄清系统性能与各参量间的关系,还可在水下激光距离选通成像系统设计中,根据应用要求,权衡 T_d, T_g 范围和控制精度与选通成像性能间的关系,实现系统的最优化设计。

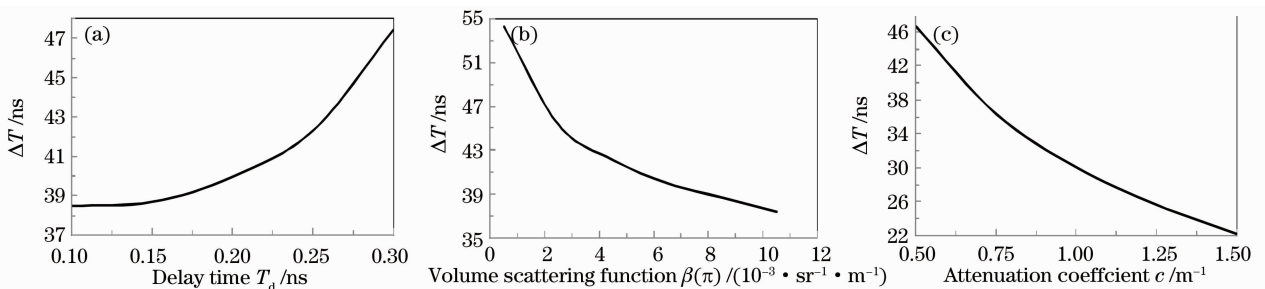


图 12 ΔT 随 $d_0, \beta(\pi)$ 和 c 的变化曲线

Fig. 12 Curves of ΔT versus $d_0, \beta(\pi)$ and c

5 结 论

基于距离选通成像原理,深入分析了由激光脉冲发射到探测器选通接收的整个物理过程;导出了已知 $T_p(0)$, T_d 和 T_g 情况下,选通接收的有效散射水体范围以及某单位水体截面后向散射脉冲中能被探测器接收的脉冲前/后点时刻;建立了脉冲激光距离选通时序模型,并设计了水下距离选通成像实验。结果表明:实验与理论结果具有较好的一致性。因此,距离选通时序模型可用于水下光电成像系统的设计和性能分析。

参 考 文 献

- 1 P. Hechman, Jr., R. T. Hodgson. Underwater optical range gating [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1967, **QE-3** (11): 445~448
- 2 J. S. Jaffe. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems [J]. *IEEE J. Oceanic Engineering*, 1990, **15**(2): 101~111
- 3 M. P. Strand. Imaging model of underwater range-gated imaging systems [C]. *SPIE*, 1991, **1537**: 151~160
- 4 C. S. Tan, A. Sluzek, G. Seet. Model of gated imaging in turbid media [J]. *Opt. Eng.*, 2005, **44**(11): 116002
- 5 D. M. He, G. G. L. Seet. Underwater lidar imaging scaled by 22.5 cm/ns with serial targets [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(3): 754~766
- 6 B. A. Swartz. Laser range gate underwater imaging advances [C]. *Proc. IEEE*, 1994, 2: II/722~II/727
- 7 E. A. McLean, H. R. Burris, Jr, M. P. Strand. Short-pulse range-gated optical imaging in turbid water [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(21): 4343~4351
- 8 Jin Weiqi, Cao Fengmei, Wang Xia *et al.*. Range-gated underwater laser imaging system based on intensified gate imaging technology [C]. *SPIE*, 2008, **6621**: 66210L-1
- 9 Zhang Yi, Bai Lianfa, Chen Qian *et al.*. Circular step advance delay gate-ranged underwater 3D imaging [J]. *J. Nanjing University of Science and Technology*, 2007, **31**(6): 753~757
张毅, 柏连发, 陈钱等. 循环步进延时距离选通水下微光三维成像[J]. *南京理工大学学报*, 2007, **31**(6): 753~757
- 10 Bai Lianfa, Zhang Yi, Chen Qian *et al.*. Some questions in the realization of range gated imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(1): 57~61
柏连发, 张毅, 陈钱等. 距离选通成像实现过程中若干问题的探讨[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(1): 57~61
- 11 Sun Jian, Zhang Xiaohui, Ge Weilong *et al.*. Relation between imaging quality and gate-control signal of underwater range-gated imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29** (8): 2185~2190
孙健, 张晓晖, 葛卫龙等. 距离选通激光水下成像系统的门控信号对图像质量的影响 [J]. *光学学报*, 2009, **29** (8): 2185~2190
- 12 Huang Youwei, Jin Weiqi, Wang Xia *et al.*. Theoretical optical backscattering model for staring underwater laser imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1192~1198
黄有为, 金伟其, 王霞等. 凝视型水下激光成像后向散射光理论模型研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1192~1198
- 13 Huang Youwei, Jin Weiqi, Ding Kun *et al.*. A comprehensive underwater laser imaging model based on temporal and spatial broadening [C]. *SPIE*, 2009, **7382**: 738237
- 14 Huang Youwei, Jin Weiqi, Ding Kun *et al.*. Underwater forward scattering imaging model based on beam spatial broadening [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(4): 669~674
黄有为, 金伟其, 丁琨等. 基于光束空间展宽的水下前向散射成像模型[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(4): 669~674
- 15 L. B. Stotts. Closed form expression for optical pulse broadening in multiple-scattering media [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17** (4): 504~505
- 16 Zhang Zhengyu, Zhou Shouhuan, Sui Xiaolin. Study on time-domain broadening of submarine laser pulse [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 850~854
章正宇, 周寿桓, 眭晓林. 激光脉冲水中传输时域展宽特性的分析计算[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 850~854