

基于独立元分析的水下激光雷达后向散射噪声去除方法

齐若伊^{1,2}, 李坤^{1,2}, 杨苏辉^{1,2*}, 高彦泽^{1,2}, 王欣^{1,2}, 李卓^{1,2}

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

摘要 模拟了调制脉冲激光雷达在水下的探测信号, 利用快速独立元分析方法(FastICA)的迭代算法将探测信号中的目标与后向散射信号分离, 恢复出浑浊水域被强后向散射淹没的弱目标反射回波信号, 极大地提升了信噪比。将解调信号设置为调制频率及三倍调制频率余弦函数之和, 目标回波信号只需一次相干解调即可获得, 其峰值位置与目标和探测器之间的延时相对应。经过独立元分析方法(ICA)迭代分离后, 水下激光探测距离可以提高 4~5 个衰减长度。

关键词 海洋光学; 后向散射; 水下激光雷达; 盲信号分离; 独立元分析

中图分类号 TN911.74

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0401004

Elimination of Backscatter Noise of Underwater LiDAR Using Independent Component Analysis Algorithm

Qi Ruoyi^{1,2}, Li Kun^{1,2}, Yang Suhui^{1,2*}, Gao Yanze^{1,2}, Wang Xin^{1,2}, Li Zhuo^{1,2}

¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, Beijing 100081, China

Abstract We simulate the detection signal of a modulated pulsed underwater light detection and ranging (LiDAR) system and use a fast independent component analysis iterative algorithm to separate the target in the detected signal from the backscatter signal. Our approach succeeds in recovering the echo signals of the weak target in muddy water submerged by strong backscattering and in improving the signal-to-noise rate. To obtain the time delay of the target reflection with respect to the transmitting signal in one step, we used single and triple modulation frequencies as references to demodulate the LiDAR echo signals. The peak position corresponds to the time delay between the target and the detector. After the iterative separation by independent component analysis, the underwater laser detection range can be increased by four to five attenuation lengths.

Key words oceanic optics; backscattering; underwater LiDAR; blind signal separation; independent component analysis

OCIS codes 010.1350; 010.3640; 010.0280

1 引言

激光雷达的探测信号常常包含大量的散射噪声^[1-2]。在浑浊水体中, 目标探测所接收的信号通常

包含目标反射信号和散射噪声。在散射噪声中, 后向散射占据主导作用, 它是一种占据非常动态范围的混乱杂波^[3-4], 会导致目标信号无法被识别, 极大地影响了目标距离的探测。目前可以通过偏振成像

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2020-09-07; 录用日期: 2020-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(61835001)

* E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn

技术^[5]、混沌激光雷达^[6]、距离选通技术^[7-8]、激光线扫描技术^[9-10]、条纹管成像技术^[11-12]、载波调制^[13]、沙氏成像^[14]等方法改善成像分辨率。其中载波调制技术是将发射激光束进行强度调制,当调制频率高于水的截止频率时(浑浊海水为 100 MHz),目标回波的调制信息得以保留,而水体散射中的调制信号被除去,利用这个特点在接收端进行相干解调,即可提取出目标回波信号的延时信息。与其他方法相比,载波调制方法具有以下优势,如无需步进选通、可以有效抑制前向及后向散射、采用扫描成像方式可以实现高精度三维成像,是最具发展前景的水下目标激光探测技术。然而在特别浑浊的水域,水体散射的信号经相干解调后仍然可能是回波信号的主体,需要进一步滤波才能提取到有用的目标信息。

盲信号分离算法利用目标回波和水体散射信号不相关的特点,结合载波调制,可以进一步提高水下探测激光雷达的探测能力。快速独立元分析方法(FastICA)算法是一种利用混叠信号中各个组分的非高斯性来实现信号分离的迭代算法,已经在成像仪器^[15]、遥感图像处理^[16]、医疗^[17]等领域得到应用。在水下激光探测中,利用后向散射噪声这一独立成分的非高斯性可以较好地将其分离。为了实现这一目标,本研究依据 FastICA 算法,也称为固定点独立元分离(Fixed-Point ICA)方法^[18],有效提升了水下激光探测的信噪比,使得其探测结果在 4 个衰减长度内的可信度大大提高。

2 基本原理(实验仿真)

海水后向散射是由悬浮粒子的后向散射叠加而成^[19],统计学上表示为光在海水中发生 N 次后向散射的回波能量的叠加。而目标反射信号则可以看作是一个特定距离下的反射回波,可以将它近似为一个特定位置的脉冲。

独立成分分析(ICA)的目标是找到非高斯数据的线性表示,使得每个分量在统计学上是独立的。ICA 方法的基本原理与中心极限定理有关。中心极限定理表明随机变量之和收敛于高斯分布。ICA 是这一定理的逆过程:基于 ICA 的模型常使用一组传感器来测量一组混合信号。每个传感器测量值比组成它的各个基础个体的信号更符合高斯分布。因此,ICA 是迭代计算“权重矩阵”,可最大化一些非高斯统计量。如果迭代结果收敛,那么 ICA 可以成功地将传感器的测量值分离为各个基础的独立信号分量。

ICA 同时估算所有来源:对于水下激光雷达,

ICA 将一并计算目标和后向散射的估计值。ICA 强制执行分离最大化非高斯性条件。在这项工作中,峰度将被用作分离度量:峰度是一个四阶统计量,其中 μ_4 是四阶中心矩, σ 是标准差,分别表示概率密度函数的“尖峰”和“长尾”。对于零均值随机变量 x ,峰度定义为

$$\text{kurt}\{x\} = E\{x^4\} - 3E\{x^2\}^2, \quad (1)$$

式中: $E\{\cdot\}$ 运算符表示期望。使用峰度作为分离度量的优点是,对于某些概率密度函数,无论它们的一阶(均值)和二阶(方差)统计量如何,其峰度是恒定的。如:高斯信号的概率密度函数总是具有恒定为 3 的峰度;FMCW 波形的概率密度函数的峰值标准为 1.5。虽然分别具有高斯和 FMCW 概率密度的两个信号可能具有相同的均值和/或方差,但是峰度可以理想地将它们区分开来。这也意味着无论水下探测的目标在远处还是近处(一二阶统计量大或者小),目标返回的波形将具有大致相同的峰度。因此,ICA 可以自动识别探测器接收到的信号中的各个成分。

2.1 盲信号分离(BSS)

盲信号分离(BSS)是一种信号处理技术^[20],最具代表性的方法有主成分分离(PCA)和独立成分分离(ICA)^[21]。ICA 是基于统计学独立性假设将几个信号的观测分成独立信号分量的方法,其基本模型为

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{S} 为源矩阵,即探测器接收到的原始回波信号,混叠了各个待分离的各个独立分量; \mathbf{A} 为“混合”矩阵,尽管可以利用先验信息生成初始估计,但通常被认为是未知的; \mathbf{X} 是源矩阵 \mathbf{S} 经过混合矩阵 \mathbf{A} 后的观测矩阵,用于计算 ICA 迭代。 \mathbf{X} 中的行数与观测次数(或传感器数量)相匹配,而列数等于信号长度。混合矩阵 \mathbf{A} 中的行数是传感器的数量,而列数等于源的数量。最后,源矩阵 \mathbf{S} 中一行对应一个源,一列对应一组观测值。为了求解给定观测矩阵 \mathbf{X} 的源矩阵 \mathbf{S} ,BSS 基于指定的统计特性自适应地学习权重矩阵,即 $\mathbf{W} \approx \mathbf{A}^{-1}$ 。一旦算法收敛,信号矩阵的估计就可表示为

$$\mathbf{S}_{\text{filter}} \approx \mathbf{W}\mathbf{X} \approx \mathbf{A}^{-1}\mathbf{X}. \quad (3)$$

使用 BSS 时必须考虑以下几个因素:用于估计统计学特性的选择、收敛标准的选择,以及观测次数(或传感器数量)和信号长度。如果独立成分的数量未知,则还需要估计独立成分的数量,当观测次数大于或等于独立成分数量时,盲信号分离可以较好地

将每个独立成分分离。

ICA 算法的研究可分为基于信息论准则的迭代估计方法和基于统计学的代数方法两大类,从原理上来说,它们都是利用了源信号的独立性和非高斯性。基于信息论的方法研究中,各国学者从最大熵、最小互信息、最大似然和负熵最大化等角度提出了

一系列估计算法,如 FastICA 算法^[18]、Infomax 算法^[22]、最大似然估计算法等。基于统计学的方法主要有二阶累积量、四阶累积量等高阶累积量方法。本文主要讨论 FastICA 算法,一般步骤见图 1,其中, $S(t)$ 为源信号, $x(t)$ 为白化函数, $z(t)$ 为正交函数,最终解混后的信号为 $y(t)$ 。

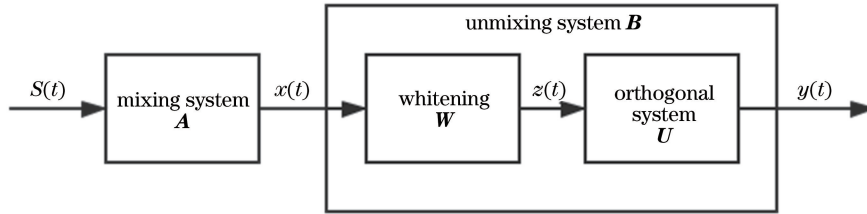


图 1 ICA 算法一般步骤

Fig. 1 General steps of ICA

在实际情况下,所获得的数据都具有相关性,所以通常都要对数据进行初步白化处理,这是因为白化处理可去除各观测信号之间的相关性,简化后续独立分量的提取过程,而且,通常情况下,作白化处理后的算法,收敛性较好。

FastICA 旨在解决优化问题,其目标是最大化变换数据的非高斯性。基本的 FastICA 算法可以用 4 个步骤来定义:

1) 选择一个随机初始权重矩阵 W_0 ;

2) 计算 FastICA 迭代: $W_+ = E\{X \cdot g(W_{k-1}X)\} - E\{g'(W_{k-1}X)\}W_{k-1}$,其中, W_+ 为迭代参量矩阵, W_k 为第 k 次迭代后的权重矩阵; $g(\cdot)$ 为适当的非线性函数,本文选取 $g(x) = x^3$, $g'(\cdot)$ 为 $g(\cdot)$ 的导函数;

3) 更新权重矩阵: $W_k = \frac{W_+}{\|W_+\|}$;

4) 如果 $\langle W_{k-1}, W_k \rangle \approx 1$ 则收敛,否则回到步骤 2),其中 $\langle \cdot \rangle$ 表示各种评估算法。

2.2 应用 FastICA 去除后向散射的方法

在水下激光雷达中探测接收到的回波信号常常包含各种独立信号成分,这些信号可能会在时间、频率上重叠或在二者皆有重叠。利用它们的统计学独立性,估计组成整个信号波的每个独立信号的分量。考虑到当有待测物体在测试区域内时,被水下激光雷达探测器接收的光子来源有三个方面,包括一是直接目标反射的光子,二是被目标反射并接触到物体后途中经过了一个或者更多的前向散射(FS)的光子,三是没有与目标接触而是直接由水体发生的后向散射(BS)的光子^[23],即

$$x_R(t) = ax(t - t_{ob}) + \sum x_{(FS)}(t - t_{ob} - t_f) + \sum x_{(BS)}(t - t_b), \quad (4)$$

式中: $x_{(FS)}$ 与 $x_{(BS)}$ 分别代表两种光子(前向散射光子和后向散射光子)的回波; $x_R(t)$ 为激光雷达回波; t_{ob} 为光子到达物体的时间; a 为直线返回的光子比例; t_f 为 f 光子经前向散射所造成的时间延迟; t_b 为 b 光子经后向散射到达物体的时间。根据统计学独立性,BS 光子始终未与物体接触,并因此与直接由目标反射的光子和目标反射后的前向散射光子相互独立。这表明应用盲信号分离去消除后向散射、减少杂波信号来辅助探测弱目标是可行的。

2.2.1 建立水下激光雷达信号的传播仿真模型

本研究拟使用强度调制高斯激光脉冲作为雷达探测波,经过调制的高斯脉冲激光探测信号可表示为

$$P_0(t) = P_0 \{1 + m \cos[2\pi f_m(t - \tau_0)]\} \exp\left[-\frac{(t - \tau_0)^2}{\tau^2}\right], \quad (5)$$

式中: P_0 为脉冲激光峰值功率; τ 为激光的脉冲半宽度; τ_0 为脉冲中心; m 为调制指数; f_m 为调制频率。

海水后向散射是由悬浮粒子的后向散射叠加而成,统计学上表示为光在海水中发生 N 次后向散射的回波能量的叠加,为

$$H_b(t) = \sum_{i=1}^N \rho_i \exp(-2\alpha vt_i) \times \delta(t - t_i), \quad (6)$$

式中: v 为光在海水中的速度; δ 为脉冲函数; N 为光在海水中传输时发生的后向散射次数; ρ_i 为发生

第 i 次后向散射时的后向散射率,它可以近似为一个常数; t_i 为光子发生第 i 次后向散射的时刻; α 为表示海水衰减系数。

海水信道中水下目标的冲激响应为

$$H_i(t) = \rho_i \exp(-2\alpha vt_i) \times \delta(t - t_i), \quad (7)$$

式中: ρ_i 为水下目标的反射系数; t_i 为光从海平面到水下目标所用的时间。可以近似地认为,海水信道中水下目标对激光的反射特性可用脉冲函数来表示。

调制高斯脉冲信号经过海水信道传输,在接收端接收到的返回信号可以表示为

$$P_m(t) = P_o(t) \otimes [H_b(t) + H_i(t)], \quad (8)$$

式中: \otimes 为卷积符号。

对上述模型进行仿真,参数如表 1。仿真结果如图 2 所示,为调制频率 $f_m = 255$ MHz 时的返回信号波形,接收到的返回信号中的目标非常不明显,几乎不可见,后向散射信号占据主要成分,此时需要应用 FastICA 处理以达到提取目标的效果。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

| Parameter | Value |
|-------------------------------------|---|
| Seawater attenuation coefficient | $\alpha = 0.2 \text{ m}^{-1}$ |
| Speed of light in sea water | $v = 2.25 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| Backscatter times | $N = 10^4$ |
| Backscatter rate in sea water | $\rho_b = 0.06$ |
| Underwater target reflectivity | $\rho_i = 0.2$ |
| Transmit pulse center delay | $t_0 = 50 \text{ ns}$ |
| Seawater depth (corresponding time) | $t_d = 150 \text{ ns}$ |
| Modulation frequency | $f_m = 225 \text{ MHz}$ |
| Modulation depth | $m = 1$ |
| Sampling interval | $t_s = 0.25 \text{ ns}$ |

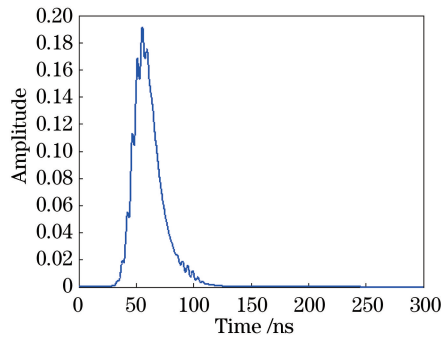


图 2 探测器接收信号

Fig. 2 Received signal

2.2.2 应用 FastICA 分离独立成分

由于使用 ICA 的条件为观测数据组数大于独立成分分量数,故需要两组不同的测试数据:设置两个不同的调制频率,得到两组不同的仿真结果。假

定两个不同调制频率满足 $f_{m2} = 3 \cdot f_{m1}$ 时,两波叠加,得到的波形经相干解调为标准脉冲波形。

由三倍角公式可知,

$$\cos 3\alpha = 4\cos^3 \alpha - 3\cos \alpha, \quad (9)$$

调制信号可表示为 $\mu[\cos(3\omega t + \theta) + \cos(\omega t + \theta)]$,其中: ω 为调制信号的振动角频率,单位为 rad/s; θ 为信号初始相位,单位是 rad; μ 为原始信号。解调时引入相干(同频同相)的参考信号 $\cos(\omega t + \theta)$,则有

$$\begin{aligned} & \mu \cos(3\omega t + \theta) \cos(\omega t + \theta) + \\ & \mu \cos(\omega t + \theta) \cos(\omega t + \theta) = \\ & 4\mu \cos^4(\omega t + \theta) - 2\mu \cos^2(\omega t + \theta), \quad (10) \end{aligned}$$

把(10)式积化和差后可化简为

$$\begin{aligned} & \mu \cos(3\omega t + \theta) \cos(\omega t + \theta) + \\ & \mu \cos(\omega t + \theta) \cos(\omega t + \theta) = \\ & \frac{1}{2} \mu + \frac{1}{2} \mu \cos(4\omega t + 4\theta) + \mu \cos(2\omega t + 2\theta). \quad (11) \end{aligned}$$

利用低通滤波器将高频信号 $\cos(4\omega t + 4\theta)$ 、 $\cos(2\omega t + 2\theta)$ 滤除,可得原始信号 μ 。

由上述仿真参数,可得输出两组探测数据的对应调制频率分布为 f_{m1} 和 $f_{m2} = 3 \cdot f_{m1}$ 。将两组数据整合至源矩阵 \mathbf{S} ,使得 \mathbf{S} 的每一行对应一组数据。如图 3 所示,分别选取在探测器范围内的调制频率 $f_{m1} = 225$ MHz 和 $f_{m2} = 3 \cdot f_{m1} = 675$ MHz,输出源信号的仿真结果。

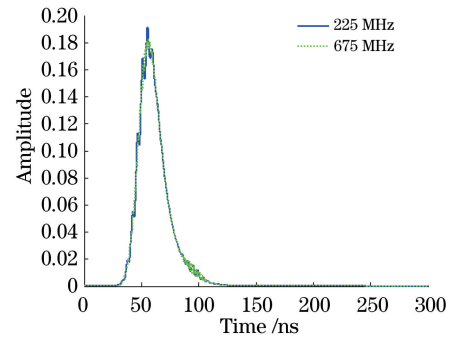


图 3 调制频率为 225 MHz 与 675 MHz 的激光雷达回波信号

Fig. 3 Received signals at modulation frequency of 225 MHz and 675 MHz

在没有任何先验条件的情况下,生成 2×2 随机矩阵 \mathbf{A} ,按(2)式,计算出探测矩阵 \mathbf{X} 。对 \mathbf{S} 进行 FastICA 迭代,并输出迭代结果。

进行 FastICA 迭代后,信号已经分为包含目标回波信号[图 4(a)]和后向散射信号[图 4(b)]。可以看到,后向散射的强度分布与理论值近似,图 4(a)中含有两个调制波峰值,其中第一个峰值对应雷达发射脉冲,与目标回波和后向散射无关,但可

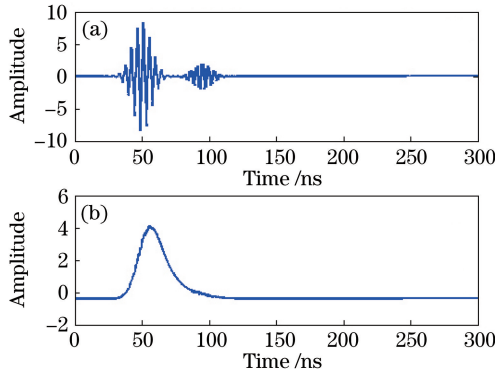


图 4 经 ICA 分离。(a)目标回波信号;(b)后向散射噪声
Fig. 4 Signal separated by ICA. (a) Target echo signal;
(b) backscattering noise

作为延时的起始位置,第二个峰值对应目标回波调制脉冲。当两个输出通道中目标回波和后向散射无法区分开来时,可将其进行相干解调,即乘以同频同相的参考信号 $\cos(\omega t + \theta)$,并通过低通滤波器将后向散射信号滤除,这是由于后向散射信号中本身不包含调制成分,因此引入参考信号后后向散射信号变为高频信号,可以由低通滤波器直接滤去。此时得到包含两个脉冲峰值的曲线[图 5],第一个峰值位置固定在 50 ns(50 ns 为发射脉冲中心,可作为延时起始时刻,由于噪声的影响,设置目标回波强度探测阈值为最高峰值的 0.01),第二个峰值位置减去

50 ns 就是目标位置。由图 5 可以看出,可滤波后的输出结果中,目标反射的回波信号为第二个脉冲信号峰值,而强度很高的后向散射已经被彻底滤除。通过找到此时的峰值位置就可以找到目标的位置。

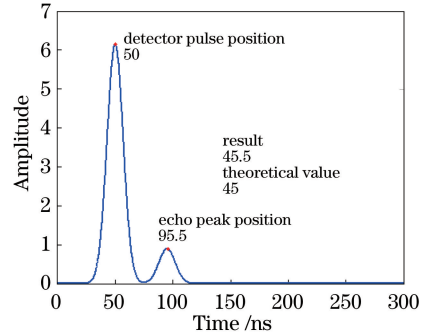


图 5 ICA 迭代分离结果
Fig. 5 Results by ICA

3 分析与讨论

3.1 发射脉冲脉冲位置对精准度的影响

为了检验发射脉冲中心位置对探测准确度的影响,设置发射脉冲区间最小值大于半个脉冲宽度,即 10~60 ns,间隔为 10 ns。由于利用反射测距,将目标深度用回波到达时间的一半来表示。针对利用每组发射脉冲测试目标深度为 1~100 ns 时的情况,比较计算结果和理论值,见图 6。

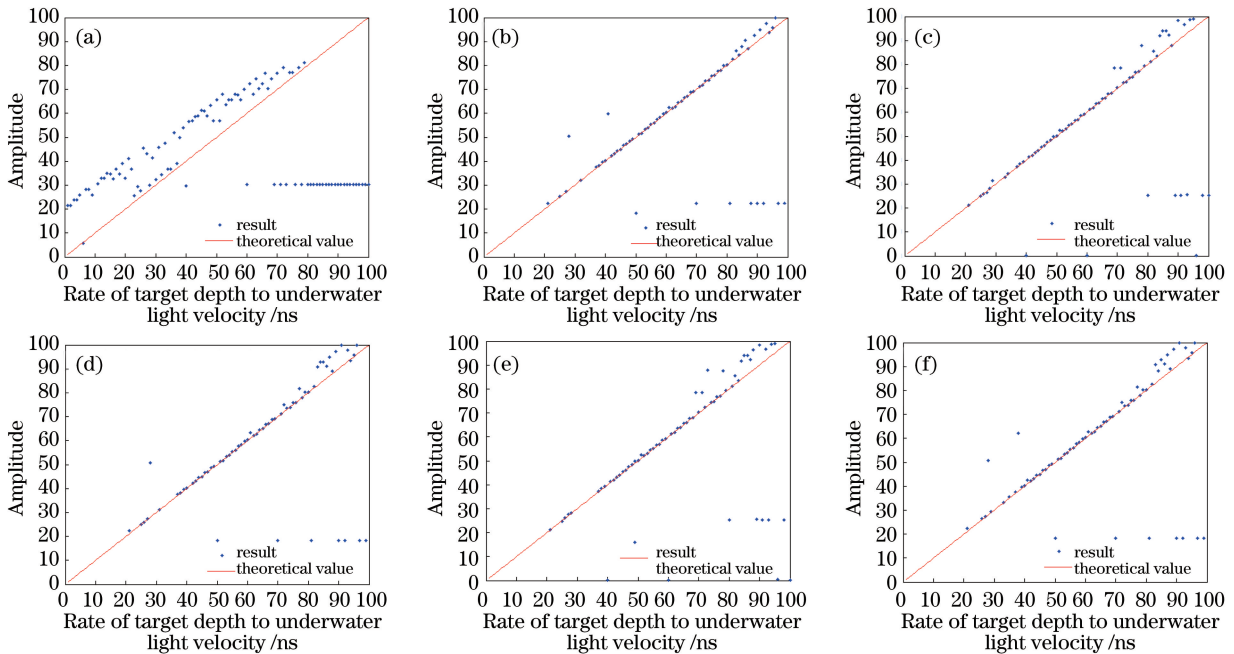


图 6 不同发射脉冲中心下,目标深度为 1~100 ns 的计算结果与理论值比较。

(a) 10 ns; (b) 20 ns; (c) 30 ns; (d) 40 ns; (e) 50 ns; (f) 60 ns

Fig. 6 Comparison of calculated results with theoretical values, target depth from 1 ns to 100 ns, detector pulse center from 10 ns to 60 ns. (a) 10 ns; (b) 20 ns; (c) 30 ns; (d) 40 ns; (e) 50 ns; (f) 60 ns

不难看出:当发射脉冲位置 $t_0 = 10$ 时,数据失真;当发射脉冲位置 $t_0 = 20 \sim 60$ ns 时,数据的可信度相似。且在目标深度为 $40 \sim 80$ ns 时,探测结果可信度非常高。目标深度小于 40 ns 和大于 80 ns 的失真情况将在下一小节进行讨论。

3.2 目标深度对精准度的影响

从图 6 基本可以看出,受到探测器参数的影响,当目标深度小于 10 ns 或大于 70 ns 时,信号完全失真。

固定发射脉冲中心为 $20 \sim 60$ ns 的一个随机值,此组数据选取 57 ns。更改目标深度间隔为 1 ns,绘制探测曲线,见图 7,可以看出,在给定的范围内探测可信度较高,但偶尔也会出现一些误差极大的点,在目标深度为 $40 \sim 80$ ns 的区间内探测值可信度非常高。

当目标深度小于 10 ns 时,信号虽然可以解调,但存在失真。固定发射脉冲位置,观察目标深度小于 30 ns 的情况,如图 8(a) 所示,可以看到,在目标

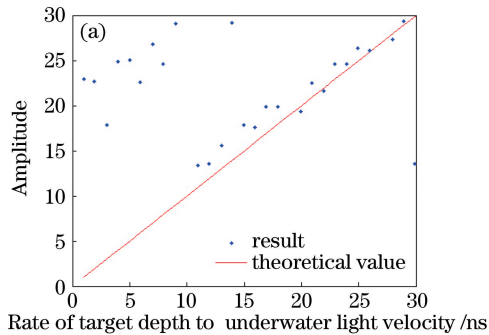


图 8 不同目标深度情况下的计算结果。(a) < 30 ns; (b) > 60 ns

Fig. 8 Comparison of calculation results under different target depths. (a) < 30 ns; (b) > 60 ns

固定发射脉冲位置,观察目标深度大于 70 ns 的情况,如图 8(b) 所示。受到海水衰减系数的影响,当目标深度大于 60 ns 后,数据开始出现失真,当目标深度大于 80 ns 时,根据本理论模型中设置的衰减系数 $\alpha = 0.2 \text{ m}^{-1}$,也即是当目标深度在 4 个衰减长度以上时,目标探测无法进行。这是由于目标过远,回波信号大于最大可探测距离(在水中衰减至小于最小可探测强度)所致。

上述结果初步显示了盲信号分离算法在水下探测去除后向散射中应用的可行性。在后续研究中需对探测阈值等参数进行调整,结合实验给出更合理的范围。

4 结 论

本研究证明独立元分析对于提高水下弱目标探测的信噪比有显著效果。基于本文建立的探测模

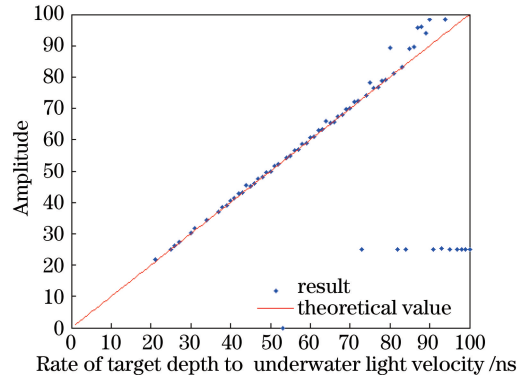
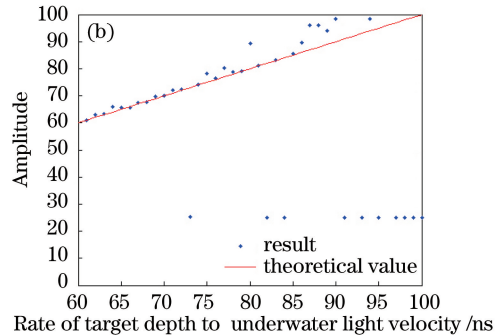


图 7 固定脉冲中心时不同目标深度下的计算结果与理论值比较

Fig. 7 Comparison of calculation results with theoretical values under different target depths in condition of fixed detector pulse center

型,FastICA 迭代可使目标反射信号与后向散射噪声分离。FastICA 方法不需要任何已知条件便可实现,它的初始权重矩阵可以完全设置为随机矩阵。由于在固定点迭代,FastICA 比传统的 ICA 方法的收敛速度更快,且分离出的信号依然具有很高的可信度。在浑浊水域中进行水下目标探测时,根据本文所设置参数的仿真结果,在海水衰减系数为 0.2 m^{-1} 的条件下,目标深度为 $10 \sim 80$ ns 时都可以进行探测,能达到 $4 \sim 5$ 个衰减长度。其中 $40 \sim 80$ ns 的探测效果最佳,与理论值偏差很小。本工作将 ICA 用于改善激光雷达水下测距性能,结果证明 ICA 算法可以明确提取目标回波,提高信噪比,后续工作将结合载波调制等方法进一步提高水下激光雷达的探测性能。



参 考 文 献

- [1] Kong J, Zhang B M. The review of under-water laser

- imaging technology and its development [J]. *Optoelectronic Technology*, 2006, 26(2): 129-132.
孔捷, 张保民. 激光水下成像技术及其进展[J]. *光电子技术*, 2006, 26(2): 129-132.
- [2] An N, Chen Y F, Liu C Z, et al. Maximum detection range of satellite laser ranging system based on characteristics of laser transmission in atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0901003.
安宁, 陈煜丰, 刘承志, 等. 基于激光大气传输特性的卫星激光测距系统的最大探测距离[J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0901003.
- [3] Cheng H. Study on the signal processing of lidar[D]. Beijing: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
程华. 激光雷达回波信号处理技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2015.
- [4] Shen Z M, Zhao T, Wang Y C, et al. Underwater target detection of chaotic pulse laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0406004.
沈振民, 赵彤, 王云才, 等. 混沌脉冲激光雷达水下目标探测[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4): 0406004.
- [5] Zhao H Y, Liu M F. Method of acquiring depth information through combining polarization and ICA[J]. *Application Research of Computers*, 2017, 34(7): 2232-2235, 2240.
赵泓扬, 刘明芳. 偏振与 ICA 相结合的深度信息获取方法[J]. *计算机应用研究*, 2017, 34(7): 2232-2235, 2240.
- [6] Rumbaugh L K, Bollt E M, Jemison W D, et al. A 532 nm chaotic lidar transmitter for high resolution underwater ranging and imaging[C]//2013 OCEANS-San Diego, September 23-27, 2013, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2013: 1-6.
- [7] Steinvall O, Andersson P, Elmquist M. Image quality for range-gated systems during different ranges atmospheric conditions [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6396: 639607.
- [8] Sun J, Zhang X H, Ge W L, 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.
- [9] Kulp T J, Garvis D, Kennedy R, et al. Development and testing of a synchronous-scanning underwater imaging system capable of rapid two-dimensional frame imaging [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(19): 3520-3530.
- [10] Zhang B, Liu Z S, Ding T F. Design and experiment of an underwater laser line scanning system [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(4): 655-661.
张博, 刘智深, 丁田夫. 水下激光线扫描探测系统的设计及试验[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(4): 655-661.
- [11] Zhong S C. Research on key technology of underwater laser imaging [D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2012.
钟森城. 激光水下目标成像关键技术研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2012.
- [12] Ososky S T. Characterization of a vertical blurring effect unique to streak tube imaging lidar [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4488: 1-7.
- [13] Liu N, Ke J Y, Yang S H, et al. Simulation and analysis on underwater transmission characteristics of Gaussian pulse lasers with carrier modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0401003.
刘娜, 柯杰耀, 杨苏辉, 等. 载波调制高斯脉冲激光水下传输特性的仿真分析[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0401003.
- [14] Zhang Y S, Zhang H W, Wu S H. Design of water scheimpflug lidar technology used for measuring small angle backscattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1101004.
张元帅, 张洪玮, 吴松华. 测量小角度后向散射的水体沙氏激光雷达技术设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1101004.
- [15] Wang L Y. Research on vibration reduction technology of unmanned undersea vehicles based on signal processing method [D]. Taiyuan: North University of China, 2009.
王凌燕. 基于盲信号处理的水下无人运载器减振技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2009.
- [16] Hu X B, Yang Y C. Application of new ICA algorithm in classification of remote sensing images [J]. *Technology Trend*, 2009(20): 239, 241.
胡晓斌, 杨永崇. ICA 新算法在遥感图像分类中的应用[J]. *科技风*, 2009(20): 239, 241.
- [17] Huang Y G, Yang Y D, He Z M. Extraction of fetal ECG utilizing blind source by combining peak wavelet analysis and fastICA [J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2019, 40(4): 6-10.
黄艺格, 杨雨丹, 贺知明. 融合峰值最大化小波分析与 fastICA 的胎儿心电图提取[J]. *医疗卫生装备*, 2019, 40(4): 6-10.
- [18] Hyvärinen A, Oja E. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis [J]. *Neural Computation*, 1997, 9(7): 1483-1492.
- [19] He S Y. Atmospheric aerosol model and seawater

- backscattering model for regions of East China Seas [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
 贺双颜. 东中国海大气气溶胶模型和海水后向散射模型[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [20] McSharry P E, Clifford G D, Tarassenko L, et al. A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2003, 50(3): 289-294.
- [21] Liang S J, Zhang Z H, Cui L L, et al. Dimensionality reduction method based on PCA and KICA [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(9): 2144-2148.
- 梁胜杰, 张志华, 崔立林, 等. 基于主成分分析与核独立成分分析的降维方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(9): 2144-2148.
- [22] Veličković P, Fedus W, Hamilton W, et al. Deep graph infomax [EB/OL]. (2018-09-27) [2020-06-21]. <https://arxiv.org/abs/1809.10341>.
- [23] Illig D W, Jemison W D, Mullen L J. Independent component analysis for enhancement of an FMCW optical ranging technique in turbid waters [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(31): C25-C33.