

基于 VMD-ICA 的水下激光雷达 抗散射信号处理方法*

李朝锋¹⁾²⁾ 王振²⁾ 刘欣宇¹⁾ 杨苏辉^{1)†} 徐震¹⁾ 樊超阳¹⁾

1) (北京理工大学光电学院, 北京 100081)

2) (中国电子科技集团公司第三十四研究所, 桂林 541000)

(2023 年 12 月 20 日收到; 2024 年 2 月 21 日收到修改稿)

提出一种基于变分模态分解 (VMD) 与独立元分析 (ICA) 相结合的水下信号处理方法. 该方法运用 VMD 将一组回波信号分解为多组按照频率高低顺序排列的本征模态信号. 然后, 将这些模态信号作为 ICA 的观测矩阵, 以确保分离所得目标回波信号的完整性. 该方法提出将分解所得的各层模态信号与原信号进行相关性和信杂比较, 以确定其分解层数. 应用 ICA 方法对散射与目标回波进行分离, 从而恢复强散射水体中的微弱目标回波, 大大提高其测距精度. 进行不同衰减长度水体的 532 nm 调频连续光水下测距实验. 经实验验证, 该信号处理方法在激光输出功率 2.3 W 时, 成功实现对 9 个衰减长度内目标的测量, 使用算法将测距精度由 16 cm 提升至 5 cm 以内.

关键词: 变分模态分解, 独立元分析, 频谱反馈

PACS: 42.55.-f, 42.62.-b, 42.68.-w

DOI: 10.7498/aps.73.20231993

1 引言

激光雷达系统与声纳系统相比, 其最显著的优势为更高的空间分辨率和更灵活的平台. 然而, 由于激光束在水中的严重衰减, 激光雷达的探测距离远不如声纳系统. 水体的光学衰减包括吸收和散射. 通过使用波长为 480—540 nm 的激光束可以大大降低吸收, 故水体散射为水下激光探测带来了更大的挑战. 经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD)^[1-4] 为一种常见的降噪方法. 该方法为 Huang 等^[5] 于 1998 年提出一种自适应时频信号处理方法. EMD 方法将待测信号视为由多个时间尺度的振荡波列构成^[6], 并从中逐级分离出带有这些尺度的振荡分量 (IMFs) 以得到待测信号的多尺度振荡特征. 但该方法存在边界效应及模态混叠现象^[7], 导致 EMD 分解结果具有不稳定性而非唯一性. 变分模态分解 (variational mode decom-

position, VMD)^[8-11] 是一种新型非递归的信号分解方法, 该方法通过迭代搜寻变分模型最优解的方式来确定每个分量的频率中心及带宽, 成功实现将模态分量与回波信号频带相关联, 以弥补 EMD 过程中模态混叠的不足. 目前, VMD 已被广泛应用于脑肌信号分析^[12] 和故障诊断^[13]. 对于浑浊水体而言, 散射与目标之间的频带差异不明显, VMD 很难滤除同一模态分量下的散射, 从而限制了其测距精度. 为了解决此问题, 我们提出一种将盲源分离 (blind source separation, BSS) 技术^[14-17] 与 VMD 相结合的方法, 用于分离散射杂波与目标回波.

BSS 技术为一类重要的信号处理方法. 它在许多领域都有广泛的应用, 如无线通信、声纳、生物医学、光纤通信和神经网络^[18-21]. 它可以在没有源信号和信号混合参数先验知识的情况下将源信号从混合观测中分离出来. 独立元分析 (independent component analysis, ICA) 是实现 BSS 的重要算法. 它基于这样一个假设, 即混合信号相互独立, ICA

* 国家自然科学基金 (批准号: 61835001, 12374400) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn

利用各个分量的统计特性差异, 通过迭代算法将各个独立信源进行分离. 本文提出的反馈式 VMD-ICA 方法^[22-25]通过频谱反馈确定分解层数, 进一步降低其冗余性, 从而提升其运算速度. 通过在水中加入不同含量的 $Mg(OH)_2$ (氢氧化镁) 模拟不同浑浊程度的海水, 探究上述算法的有效性. 实验验证, VMD-ICA 信号处理方法在 9 个衰减长度内, 测距精度为 5 cm 以内.

2 VMD-ICA 算法

VMD 是由 Dragomiretskiy 和 Zosso 于 2014 年提出的一种新型非递归的信号分解方法^[8], VMD 方法以变分思想进行模态估计, 其通过在频率内不断搜索约束变分模型的最优解实现将信号自适应分解为各模态及其中心频率, 最后各模态经傅里叶逆变换到时域. 对于水下调频连续激光雷达回波信号而言, VMD 可将回波信号 $X(t)$ 分解为 k 个具有有限带宽 $u_k(t)$ 的模式信号 $P_k(t)$, 各个模式信号均含有相应的频带中心 $\omega_k(t)$, 其约束条件为各个 $P_k(t)$ 之和等于待分离的回波信号 $X(t)$, 且每个模态分量的估计带宽之和最小, 即 $\sum_k P_k(t) = X(t)$,

$$\omega_k(t) = \{\omega_1(t), \omega_2(t), \dots, \omega_k(t)\},$$

$$u_k(t) = \{u_1(t), u_2(t), \dots, u_k(t)\}.$$

水下激光雷达回波 VMD 分解过程如图 1 所示.

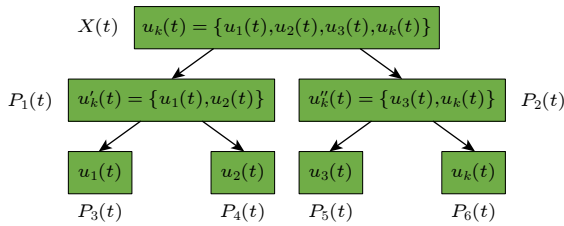


图 1 VMD 分解过程

Fig. 1. VMD decomposition process.

该方法可将目标信号从具有调制频带特性的模式中提取出来, 并滤除其余频带模式的散射分

量. 但对混叠于其模式带宽内的散射杂波, 该方法难以分离散射与信号. 故我们提出将 VMD 与 ICA 方法相结合的信号处理方法, 将 VMD 分解所得模式信号 $P_k(t) = \{P_3(t), P_4(t), P_5(t), P_6(t)\}$ 作为 ICA 的输入矩阵, 构建 ICA 的观测矩阵 $\mathbf{X}(\omega, t)$:

$$\mathbf{X}(\omega, t) = [P_3(u_1, t), P_4(u_2, t), P_5(u_3, t),$$

$$P_6(u_k, t)] = \mathbf{A}\mathbf{S}, \quad (1)$$

其中, \mathbf{S} 是源矩阵 ($\mathbf{Y} \times \mathbf{M}$), 它由要分离的独立分量组成; \mathbf{A} 为“混合”矩阵 ($N \times Y$). \mathbf{A} 中的行数是独立观测值 N 的数量, 列数是源矩阵 \mathbf{Y} 的数量. 源矩阵 \mathbf{S} 的行数对应源信号数目, 每列对应一组观测数据. 为了从观测矩阵 $\mathbf{X}(\omega, t)$ 中获得有效的信号源矩阵 \mathbf{S} . 采用峰度等统计学方法度量其高斯性, 计算相应的“权重矩阵”的最大值:

$$\mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1}. \quad (2)$$

一旦算法收敛, 就可以成功地分离出信号源, 并且可以表达对信号的估计:

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

在实际应用中, 为了提升运算速度及降低数据的冗余性, 对 VMD 各层分解结果进行频谱成分分析, 计算各层模态分量 IMF 与参考信号的相关系数和信杂比 $SCR = 10 \log(S_{\text{signal}}/S_{\text{sca}})$, S_{signal} 为各层模态信号中目标回波强度, S_{sca} 为各层模态信号中散射杂波平均强度. 选取模态分量 IMF 中相关系数和信杂比均为最大值的模态, 该模态分量对应的分解层数作为 VMD 的分解层数上限. 然后, 将各层分解的所有 IMF 结果与原信号作为独立元分析 (ICA) 的观测矩阵, 以确保分离所得目标回波信号的完整性.

3 水下目标测距实验

光源为实验室自制的射频 (RF) 强度调制 532 nm 激光器^[26]. 1064 nm RF 信号源 (Siglent,

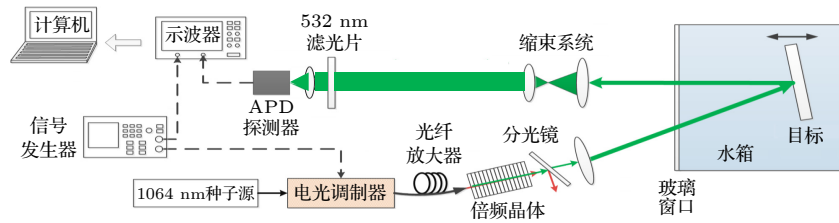


图 2 激光水下探测光学系统

Fig. 2. Laser underwater detection optical system.

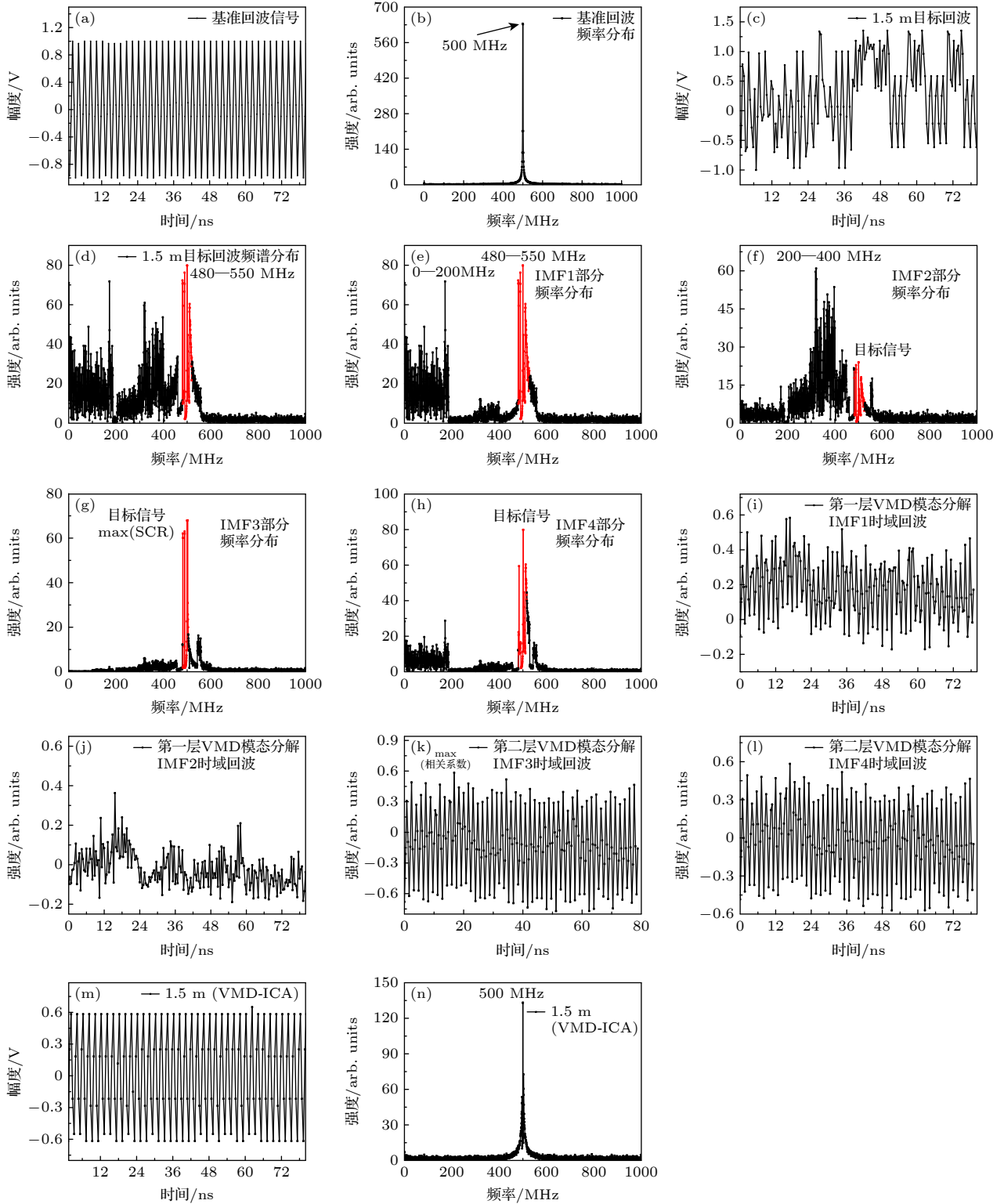


图3 镜面目标回波信号波形对应频谱能量分布及VMD-ICA方法处理结果 (a), (b)入射窗回波信号(基准)及其对应的FFT频谱; (c), (d) 1.5 m处镜面目标回波信号及其对应的FFT频谱; (e)–(l)回波信号的变分模态分解结果及其逆傅里叶变换时域波形; (m), (n) ICA处理结果(信号部分)及对应FFT频谱

Fig. 3. Spectral energy distribution corresponding to the waveform of mirror target echo signal and the processing results of VMD-ICA method: (a), (b) The reference signal and the corresponding FFT spectrum; (c), (d) mirror target echo and the corresponding FFT spectrum at 1.5 m; (e)–(l) spectra of IMFs of VMD and the corresponding inverse Fourier transform in time domain; (m), (n) the result of ICA (target echo) and the corresponding FFT spectrum.

SSG3021) 经电光调制器 (EOM) 调制后, 可输出调制频率 10 MHz 到 2.1 GHz 的强度调制连续激光. 调制后的激光经两级掺铒光纤放大器 (YDFA) 放大并输入 MgO:PPLN 非线性晶体倍频输出 532 nm 激光, 其最大输出功率为 2.56 W, 调制深度为 0.76. 实验系统如图 2 所示, 将强度调制连续激光经过准直后入射到 3 m 长的水箱中, 准直光斑直径约 1 mm, 发散角约 0.5 mrad. 水中目标为反射率约 0.8 的玻璃板, 反射信号被直径 2 in (1 in = 2.54 cm)、焦距 75 mm 的透镜接收后聚焦到 APD 探测器上. APD 探测器接收的回波信号与信号发生器输出的参考信号, 输入到示波器. 通过加入 Mg(OH)₂ 粉末改变水体浊度, 并用水泵来循环一段时间, 使其浑浊程度分布均匀.

对探测信号与参考信号进行互相关运算, 以获得目标测距信息. 目标位置由互相关运算结果的最大值位置来确定. 为了确定目标对应距离, 首先确定水箱玻璃入射窗口位置, 对入射窗口回波和参考信号进行 100 次互相关运算, 并以其平均值作为入射窗位置, 将此值视为原点. 该系统测距误差为 1.5 cm.

图 3 为衰减系数 4.0 m⁻¹ 时, APD 探测器检测到的镜面目标回波信号波形、对应频谱及 VMD-ICA 方法处理结果. 我们使用的 APD 探测器的放大器模块具有 500 MHz 的带宽. 因此, 将激光器的调制频率上限设置为 500 MHz. 图 3(a) 为入射窗回波信号 (基准), 图 3(b) 为其对应的快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 频谱, 该回波信号频谱主要集中于中心频率为 500 MHz 的调制频带内. 图 3(c) 为 1.5 m 处镜面目标回波信号, 图 3(d) 为其对应的 FFT 频谱. 在图 3(c), (d) 中, 能发现该调频连续光回波因水中散射光影响, 出现多个较强的频带杂波干扰并将原本调制频带展宽. 图 3(e) — (l) 为对回波信号进行变分模态分解结果及其逆傅里叶变换时域波形, 可以发现经两层变分模态分解后, 第 2 层模态分解信号中 IMF3 的信杂比以及其与参考回波信号的相关系数均高于其余模态 (IMF1, IMF2, IMF4). 该结果表明变分模态分解已达其分解上限, 其分解层数为 2. 以图 3(i) — (l) 中 VMD 分解结果构建 ICA 分离的输入矩阵, 其分离结果中信号部分及对应 FFT 频谱如图 3(m), (n) 所示. 在图 3(m), (n) 中, 发现经 VMD-ICA 方法处理后, 散射杂波在多数频带分布明显减弱; 相应地, 回波信号的调制频带展宽效应大幅降低. 该信号处理方

法实质为自适应带通与独立性统计联合探测. VMD 为一种具有带通特性的模式分解, 可去除与调制频带差异较大的散射杂波 (<200 MHz); 但对于相邻频带以及同一通带内的散射杂波, 仅以提升分解层数的方式难以较好滤除. 故我们将 VMD 方法与独立元分析相结合, 以目标信号与散射在统计独立方面差异, 实现此部分回波中散射与信号的分离.

基于 VMD-ICA 测距方法的整体测距结果如图 4(a) — (c) 所示. 在输出功率为 2.3 W 以及采用

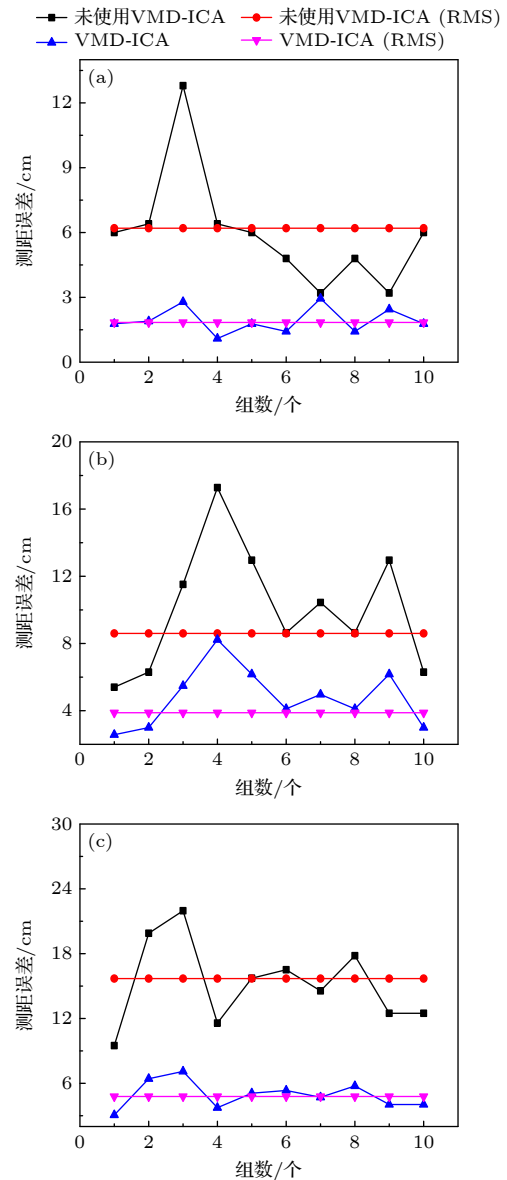


图 4 对于衰减长度不同的水体, VMD-ICA 方法测量的测量误差以及均方根 (a) 衰减长度为 3; (b) 衰减长度为 6; (c) 衰减长度为 9

Fig. 4. Measurement errors and root mean square of the distance measurement method for water bodies with attenuation lengths of (a) 3, (b) 6, (c) 9 based on VMD-ICA ranging results.

APD 探测器探测, 调制频率为 500 MHz 下, 其最远探测距离为 9 个衰减长度. 测距精度使用均方根 (RMS) 来衡量可得该测距方法在 9 个衰减长度内测距精度小于 5 cm.

4 结 论

本文提出一种基于 VMD 与 ICA 相结合的水下信号处理方法. 针对水下激光雷达回波中复杂的时频混叠问题, 该方法运用 VMD 将一组回波信号分解为多组按照其频率高低顺序排列的本征模态信号. 然后, 将这些模态信号作为 ICA 的观测矩阵, 应用 ICA 方法特有的统计学思想对散射与目标回波进行分离, 从而恢复强散射水体中的微弱目标回波, 大大提高其测距精度. 经实验验证, 该信号处理方法在 532 nm 调频连续光输出功率 2.3 W 内, 成功实现对 9 个衰减长度内目标的准确测量, 其测距精度由 16 cm 提升至 5 cm 以内.

参考文献

- [1] Liang J, Peng S P, Zheng J 2014 *Comput. Eng. Appl.* **50** 7 (in Chinese) [梁喆, 彭苏萍, 郑晶 2014 *计算机工程与应用* **50** 7]
- [2] Battista B M, Knapp C C, McGee T, Goebel V 2007 *Geophysics* **72** 29
- [3] Jia R S, Zhao T P, Sun H H 2015 *Chin. J. Geophys.* **58** 1013 (in Chinese) [贾瑞生, 赵同彬, 孙红梅 2015 *地球物理学报* **58** 1013]
- [4] Li Y, Peng J L, Ma H T 2013 *Chin. J. Geophys.* **56** 626 (in Chinese) [李月, 彭蛟龙, 马海涛 2013 *地球物理学报* **56** 626]
- [5] Huang N E, Shen Z, Long S R, Wu M L, Shi H H, Zheng Q N, Yen N C, Tung C C, Liu H H 1998 *Roy. Soc. A-Math. Phys.* **454** 903
- [6] Zheng Z G, Liu L H 2010 *Empirical Modal Analysis and Wavelet Analysis and their Applications* (Beijing: Meteorological Publishing House) p83 (in Chinese) [郑祖光, 刘莉红 2010 *经验模态与小波分析及应用* (北京: 气象出版社) 第 83 页]
- [7] Hu A J, Sun J J, Xiang L 2011 *Vib. Test. Diag.* **31** 429 (in Chinese) [胡爱军, 孙敬敬, 向玲 2011 *振动、测试与诊断* **31** 429]
- [8] Dragomiretskiy K, Zosso D 2014 *IEEE Trans. Signal Process.* **62** 531
- [9] Dey P, Satija U, Ramkumar B 2015 *Annual IEEE India Conference (INDICON) New Delhi, India, December 17-20, 2015* p1
- [10] Gao Y F, Zhu Y L, Yan H 2016 *Trans. China Electrotech. Soc.* **31** 24 (in Chinese) [高艳丰, 朱永利, 闫红艳 2016 *电工技术学报* **31** 24]
- [11] Ma Z Q, Li Y C, Liu Z 2016 *Vib. Shock* **35** 134 (in Chinese) [马增强, 李亚超, 刘政 2016 *振动与冲击* **35** 134]
- [12] Xie P, Yang F M, Li X X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 118701 (in Chinese) [谢平, 杨芳梅, 李欣欣 2016 *物理学报* **65** 118701]
- [13] Tang G J, Wang X L 2015 *J. Xi'an Jiaotong Univ.* **49** 73 (in Chinese) [唐贵基, 王晓龙 2015 *西安交通大学学报* **49** 73]
- [14] Comon P 1994 *Signal Process.* **36** 287
- [15] Laubach M, Shuler M, Nicolelis M A L 1999 *Nicolelis Neurosci. Meth.* **94** 141
- [16] Bell A J, Sejnowski T J 1995 *Neurosci. Methods* **7** 1129
- [17] Hyvarnen A, Oja E 2000 *Neural Networks* **13** 411
- [18] Hyvarnen A, Oja E 1997 *Neural Comput.* **9** 1483
- [19] Vrabie V D, Mars I J, Lacoume J L 2004 *Signal Process.* **84** 645
- [20] Nian R, Liu F, Bo B 2013 *Sensors* **13** 9104
- [21] Illig D W, Jemison W D, Mullen L J 2016 *Appl. Opt.* **55** C25
- [22] Prasad R, Deo C R, Li Y 2018 *Geoderma* **330** 136
- [23] Colominas M A, Schlotthauer G, Torres M E 2014 *Biomed. Signal Proces.* **14** 19
- [24] Yu Y, D J Yu, Cheng J S 2006 *Sound Vib.* **294** 269
- [25] Kim D, Kim S K 2012 *Behav. Res. Methods* **44** 1239
- [26] Li K, Yang S H, Liao Y Q, Lin X T, Wang X, Zhang J Y, Li Z 2020 *IEEE Photonics J.* **12** 1503811

Anti-scattering signal processing method of VMD-ICA based underwater lidar*

Li Chao-Feng¹⁾²⁾ Wang Zhen²⁾ Liu Xin-Yu¹⁾
Yang Su-Hui^{1)†} Xu Zhen¹⁾ Fan Chao-Yang¹⁾

1) (*School of Optics Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

2) (*34th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Guilin 541000, China*)

(Received 20 December 2023; revised manuscript received 21 February 2024)

Abstract

This paper proposes an underwater signal processing method based on the combination of variational mode decomposition (VMD) and independent component analysis (ICA). In this method, the VMD is used to decompose a set of echo signals into groups of eigenmodal signals arranged according to the order of their frequencies. These modal signals are then used as an observation matrix for ICA to ensure the integrity of the separated target echo signals. In this method, the correlation between the decomposed modal signals and the original signal is used to select the signals which are used as input matrix rows for ICA. The signal-to-clutter ratio is used to determine the number of decomposed layers. The ICA is used to separate the scattering and target echoes, so as to recover the weak target echoes in the strongly scattered water and greatly improve the ranging accuracy. A 532 nm intensity-modulated continuous wave (CW) laser is used in the underwater ranging experiments. The attenuation coefficient of the water is changed by adding $\text{Mg}(\text{OH})_2$, ranging experiments are carried out at different attenuation lengths. The experimental results show that the signal processing method can be used to successfully measure the target within 9 AL (attenuation length) when the laser output power is 2.3 W, and the ranging accuracy is improved from 16 cm to less than 5 cm by using the algorithm. The proposed method can be applied to underwater lidar application in turbid water and long distance ranging underwater where the scattering dominates the echoes.

Keywords: variational mode decomposition, independent element analysis, spectral feedback

PACS: 42.55.-f, 42.62.-b, 42.68.-w

DOI: [10.7498/aps.73.20231993](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231993)

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61835001, 12374400).

† Corresponding author. E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn



基于VMD-ICA的水下激光雷达抗散射信号处理方法

李朝锋 王振 刘欣宇 杨苏辉 徐震 樊超阳

Anti-scattering signal processing method of VMD-ICA based underwater lidar

Li Chao-Feng Wang Zhen Liu Xin-Yu Yang Su-Hui Xu Zhen Fan Chao-Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 094203 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231993

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231993>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

优化递归变分模态分解及其在非线形信号处理中的应用

Application of the proposed optimized recursive variational mode decomposition in nonlinear decomposition

物理学报. 2019, 68(23): 238401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191005>

基于变分模态分解与多尺度排列熵的生物组织变性识别

Recognition of denatured biological tissue based on variational mode decomposition and multi-scale permutation entropy

物理学报. 2019, 68(2): 028702 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181772>

流场非线性特征提取与混沌分析

Nonlinear feature extraction and chaos analysis of flow field

物理学报. 2020, 69(24): 249501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200625>

基于弹性变分模态分解的癫痫脑电信号分类方法

eEpileptic electroencephalogram signal classification method based on elastic variational mode decomposition

物理学报. 2021, 70(1): 018702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200904>

基于弹性变分模态提取的时间相关单光子计数信号去噪

A time-correlated single photon counting signal denoising method based on elastic variational mode extraction

物理学报. 2021, 70(17): 174304 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210149>

基于改进经验模态分解域内心动物理特征识别模式分量的心电信号重建

Electrocardiogram signal reconstruction based on mode component identification by heartbeat physical feature in improved empirical mode decomposition domain

物理学报. 2021, 70(3): 038702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201122>