

引用格式: 王斌贤, 冯海泓, 黄敏燕, 等. 基于参量阵双通道信息的富钴结壳高精度测厚算法[J]. 声学技术, 2021, 40(4): 464-469. [WANG Binxian, FENG Haihong, HUANG Minyan, et al. Thickness measurement method of Cobalt-Rich Manganese Crusts based on dual-channel information of parametric array[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(4): 464-469.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.04.004

基于参量阵双通道信息的富钴结壳 高精度测厚算法

王斌贤^{1,2}, 冯海泓¹, 黄敏燕¹, 胡波³, 杨永³

(1. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 201815; 2. 中国科学院大学, 北京 100190;
3. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东广州 510075)

摘要: 富钴结壳作为一种重要的海底矿产资源, 在工业生产中有着重要应用, 具有潜在的开采价值, 富钴结壳的厚度是评估开采矿区资源量的重要指标。论文基于原位参量探测器测量富钴结壳厚度, 探测器向结壳垂直发射调制信号, 并接收返回的原频、差频双通道回波信号, 分别提取两个回波信号的包络, 然后提取回波信号峰值点的到达时刻, 采用时延差法测量结壳厚度。回波到达时刻的提取是影响测厚精度的关键因素, 传统的包络提取方法如希尔伯特变换, 可以准确地提取出原频信号的包络, 但对差频信号的提取精度较差。因此, 通过希尔伯特变换与自相关算法分别提取原频信号与差频信号包络, 提高了测厚的精度。通过水池试验分析了该算法的测厚性能, 随后将该算法应用于中国大洋某航次的富钴结壳海试数据, 验证了该算法的可行性。

关键词: 参量阵; 富钴结壳; 希尔伯特变换; 自相关算法

中图分类号: TB533

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-04-0464-06

Thickness measurement method of Cobalt-Rich Manganese Crusts based on dual-channel information of parametric array

WANG Binxian^{1,2}, FENG Haihong¹, HUANG Minyan¹, HU Bo³, YANG Yong³

(1. Shanghai Acoustic Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201815, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Guangzhou Marine Geological Survey of China Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China)

Abstract: Cobalt-Rich Manganese Crusts (CRCs) is one of the important submarine mineral resources and has important application in the industry, so the exploitation of CRCs has potential mining value. The thickness of CRCs is an important index to evaluate the amount of resource in mining areas. In this paper, the prototype parametric acoustic probe is developed for in-situ measurement of CRCs thickness. The prototype transmits primary signals vertically to undersea sediment and receives the dual-channel echo signals of primary and difference frequencies. The envelopes of the primary signal and difference signal are extracted respectively to get the arrival time of the peak point of echo signal, and then the "time delay difference" method is used for the thickness measurement. The extraction of echo arrival time is the key factor of the measurement. Traditional methods of envelope extraction, such as Hilbert transform can precisely extract the envelope of the primary echo, but the extraction accuracy of the envelope of the difference frequency signal is poor. In this paper, the envelopes of the primary signal and difference signal are extracted by Hilbert transform and autocorrelation algorithm respectively, which improves the accuracy of thickness measurement. The pool test is conducted to analyze the performance of the algorithm. The sea trial result in a China voyage shows the effectiveness of the algorithm.

Key words: acoustic parametric array; Cobalt-rich Manganese Crusts (CRCs); Hilbert transform; autocorrelation method

0 引言

富钴结壳作为海底重要的矿产资源之一, 是一

种生长在水深 500~3 000 m 的海底山坡硬质基岩上的“壳状”沉积物^[1], 富含钴、钛、镍、金、锰等多种金属元素, 因钴含量较高而得名富钴结壳, 这些金属在航天航空和交通运输等领域具有广泛的应用^[2]。我国是一个“缺钴”的国家, 大部分钴依赖进口, 由于陆地上钴资源有限, 独立钴矿很少, 即使依赖进口也很难满足需求^[3]。因此, 开发富钴结壳资源具有重要的战略意义和潜在的经济价值。

2014 年, 我国与国际海底管理局签订了富钴结

收稿日期: 2020-05-19; 修回日期: 2020-06-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61801471)、中国大洋矿产资源开发协会资源环境类课题(DY135-C1-1-08)。

作者简介: 王斌贤(1994—), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向为声学。

通信作者: 冯海泓, E-mail: fhh@mail.ioa.ac.cn

壳勘探合同，获得面积为 3 000 km² 的海山矿区，勘探时间为 15 年，我国需在第 8 年与第 10 年分别放弃 1 000 km² 的开采区域，最终保留 1 000 km² 作为享有优先开采权的矿区。富钴结壳的厚度是评估矿区的指标之一，因此，设计测量精度高的结壳测厚算法对确定最终采矿区，提高开采效率具有重要意义。

富钴结壳的测厚方法主要包括接触式测量和原位测量两种，具体而言，若采用定点浅钻等接触式方法，因取样设备庞大，故效率较低、成本较高，无法实现大范围内富钴结壳的连续测厚。而声学探测中的原位测量方法，则具备精确、高效、经济的优点，现已被公认为一种水下探测的快速可靠的方法^[4-5]。常见的声学探测设备包括多波束声呐、侧扫声呐等。然而，这些设备基于线性声学理论，如不增大发射换能器尺寸便无法同时获得较低的发射频率与较窄的指向性^[6]。

相较而言，非线性参量阵技术则是一种经济、高效的测量技术。它可以在小尺寸换能器的条件下，产生兼具低频率与窄指向性特点的差频信号，适合海底探测^[7-8]。2010 年，东京工业大学采用了一种参量探头^[9-10]测量结壳厚度，该探头产生的差频信号可以穿透富钴结壳，并记录结壳表面与底面的回波信号，通过时延差法^[11]计算其厚度。2019 年，声学研究所东海研究站进一步优化了参量探头，研制了相控参量原位探测器^[12-13]。首先，探测器可以通过控制阵列的相位改变工作距离，以适应海底起伏的环境。其次，探测器同时记录、采集原频回波信号与差频回波信号，提高了测厚精度。

本文同样采用时延差法作为测量富钴结壳厚度的基本方法，首先提取回波信号包络，然后分别检测富钴结壳表面回波与底面回波峰值以确定两个回波的到达时刻，再根据到达时刻的时间差与富钴结壳的声速计算结壳厚度。包络提取方法影响着测厚的精度，本文比较了三种典型的算法：希尔伯特变换^[14]，复小波变换^[15]与自相关算法^[16]，通过水池实验，分析了三种算法的性能并提出了一种基于原频、差频双通道回波信号的富钴结壳自动测厚算法，然后将该算法应用于中国大洋某航次的海试数据处理中，试验结果验证了该算法的可行性。

1 原位探测器系统组成

如图 1 所示，原位探测器主要由接收换能器、发射阵、带通滤波板、发射控制板、信号采集板以及主控计算机组成。

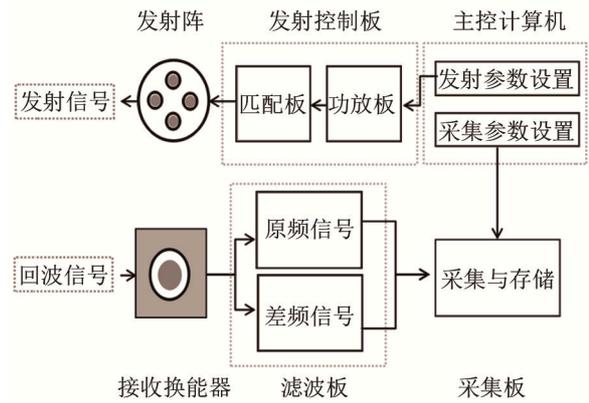


图 1 原位探测器系统组成
Fig.1 System description of the parametric acoustic probe

主控计算机向发射控制板传递发射参数，然后发射控制板控制发射阵发射由 1 MHz 原频信号调制的 100 kHz 正弦波信号。基于非线性声学的基本原理，原位探测器可产生差频信号，且差频信号沿声轴方向以相同的速度与原频信号一起向前传播。当两列波到达富钴结壳表面时，由于介质的阻抗差异，在表面同时产生原频回波与差频回波。高频的原频波在富钴结壳中有较严重的衰减，而低频的差频波则可以穿透富钴结壳并在结壳底面产生回波，示意图如图 2 所示。

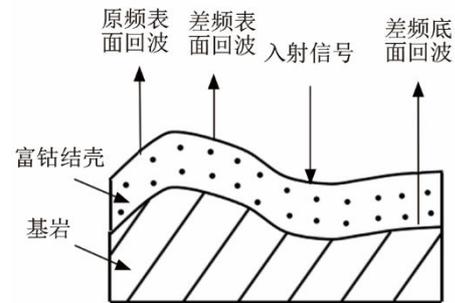


图 2 探测回波信号示意图
Fig.2 Schematic diagram of echo signals for detection

接收换能器接收反射回来的回波信号，分别进行滤波，进而分离出原频通道信号与差频通道信号，再根据主控计算机配置的采样参数进行信号的采集。滤波与采样的具体参数如表 1 所示。

表 1 滤波与采样参数
Table 1 Parameters for filtering and sampling

采样率/MHz		中心频率/MHz		截止频率/MHz	
原频	差频	原频	差频	原频	差频
5	2	1	0.2	0.9/1.1	0.1/0.35

2 测厚算法

富钴结壳的分布面积很广，通常为几十平方千

米, 因此, 设计算法的目标是对结壳厚度进行自动测量。本文提出的基于双通道回波信号的测厚算法, 适用于富钴结壳-基岩的双层底质结构, 即富钴结壳附着于海底基岩, 结壳的表面是裸露的。算法分为 5 个步骤, 框图如图 3 所示。

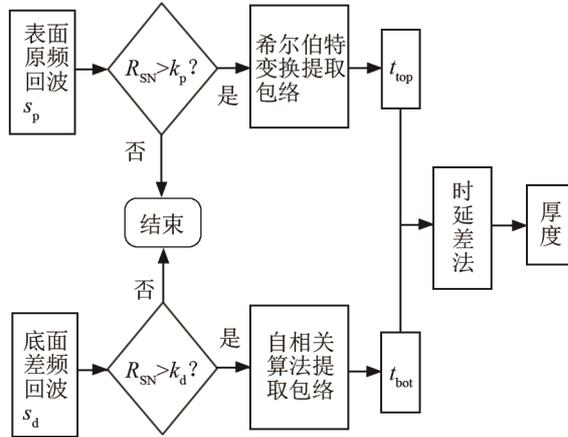


图 3 基于双通道回波信号的测厚算法流程图

Fig.3 Flowchart of the algorithm for thickness measurement based on the dual-channel echo signals

(1) 信噪比检测

分别检测原频信号 $s_p(t)$ 与差频信号 $s_d(t)$ 的信噪比 R_{SN} , 判断信号是否满足厚度测量要求^[10]:

$$20 \lg \frac{\max [|s_p(t)|]}{|s_p(t)|} \geq k_p \quad (1)$$

$$20 \lg \frac{\max [|s_d(t)|]}{|s_d(t)|} \geq k_d \quad (2)$$

其中: k_p 、 k_d 为信噪比阈值, 根据具体的回波信号, 选取合适的数值。如果信噪比满足式(1)、(2)的条件, 则进行下一步回波到达时刻提取。

(2) 获取结壳表面回波到达时间 t_{top}

由于原频信号与差频信号相比, 具有更高的信噪比与更好的分辨率, 故采用原频信号计算结壳表面回波到达时间。其次, 由于原频信号为窄带信号, 因此, 通过希尔伯特变换提取原频信号的包络 $H[s_p(t)]$ 。随后, 提取包络的峰值点作为结壳表面的回波到达时刻 t_{top} ^[10]:

$$t_{top} = \arg \max \{ H[s_p(t)] \} \quad (3)$$

(3) 获取结壳底面回波到达时间 t_{bot}

由于差频信号频率低, 可以穿透富钴结壳产生较强的底面回波, 所以采用差频信号计算结壳底面回波的到达时间。差频信号频带较宽, 希尔伯特提取包络时会产生较多突刺, 因此, 通过自相关算法提取差频信号的包络 $A[s_d(t)]$ 。

获取底面回波到达时间 t_{bot} 需要提取 $A[s_d(t)]$ 的第二个峰值点, 富钴结壳的厚度在一定的范围内,

一般是 5~30 cm 之间, 因此, t_{bot} 的值位于 t_{max} 与 t_{min} 之间:

$$t_{max} = t_{top} + 2L_{max} / c_{cobalt} \quad (4)$$

$$t_{min} = t_{top} + 2L_{min} / c_{cobalt} \quad (5)$$

其中: L_{max} 为结壳最大厚度, L_{min} 为结壳最小厚度, c_{cobalt} 为结壳中声速。在该范围内, 提取包络峰值点作为结壳底面的回波到达时刻 t_{bot} ^[10]:

$$t_{bot} = \arg \max_{t_{min}}^{t_{max}} \{ A[s_d(t)] \} \quad (6)$$

(4) 计算富钴结壳声速 c_{cobalt}

不同海区的富钴结壳的声速差异较大, 在实际测量特定区域内富钴结壳厚度之前, 需要采集结壳样本并测量该区域内的结壳声速。通过结壳物理性质测量设备, 采用插入取代法测量结壳声速, 在发射与接收换能器之间, 将结壳样品插入到平面波传播路径上, 通过测量样本插入前后声信号到达时间的变化, 对富钴结壳的声速^[12]:

$$c_{cobalt} = \left(\frac{1}{c_0} + \frac{t_{after} - t_{before}}{L} \right)^{-1} \quad (7)$$

其中: c_0 为水中声速, t_{before} 是插入样本前的信号到达时间, t_{after} 是插入样本后的信号到达时间, L 是样本厚度。

(5) 计算富钴结壳厚度 L_{cobalt}

通过下式计算富钴结壳厚度:

$$L_{cobalt} = \frac{1}{2} c_{cobalt} (t_{bot} - t_{top}) \quad (8)$$

3 试验

通过水池试验与海试试验对测厚算法的可行性进行分析。试验发现, 回波到达时刻的提取是影响测厚精度的关键因素, 同时, 包络提取算法是影响到达时刻提取的关键因素。因此, 在水池试验中比较了不同包络提取算法的测厚误差, 如希尔伯特变换、小波变换与自相关算法, 选择分别适用于原频信号与差频信号的包络提取算法。

3.1 水池试验

实验室内有多种不同密度的人工合成材料用于模拟海底底质(简称: 仿体)。在实验室水池内, 通过仿体分析了测厚算法的性能, 试验配置如图 4 所示。

依据 Biot 多孔介质声学理论^[17]: 底质回波信号与底质的孔隙率密切相关, 而底质的孔隙率与底质密度密切相关。因此, 将底质的密度作为选择仿体材料的依据。本文采用一种聚甲醛 (Polyformaldehyde, POM) 和一种聚丙烯 (Poly Tetra

Fluoroethylene, PTFE)分别模拟富钴结壳和基岩,其中 POM 厚度为 10.0 cm,声速为 2 230 m·s⁻¹,放置在距参量阵 1.5 m 处。

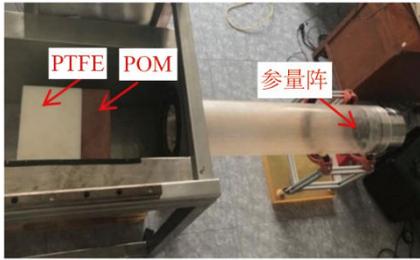
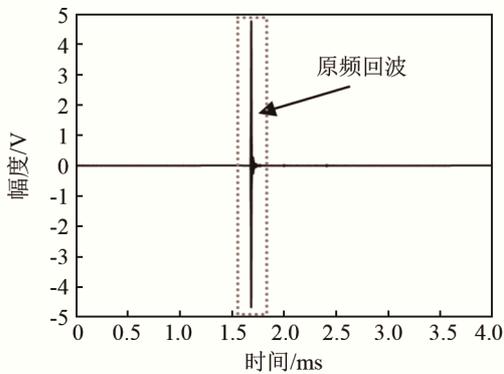


图 4 水池仿体试验布局

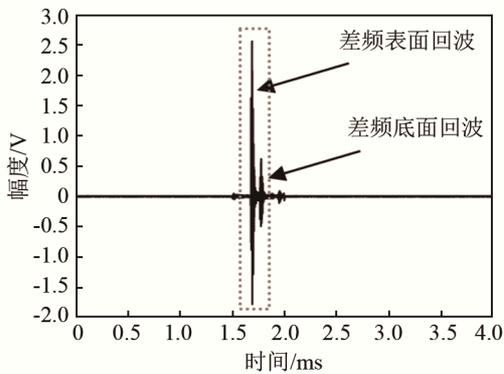
Fig.4 Layout of pool test with simulated seabed environment

采集到的两个通道的信号如图 5(a)和图 5(b)的波形所示。采样的时间为 4.0 ms,其中 1.6~1.9 ms 为实际的回波信号,如图中虚线部分。

比较了希尔伯特变换、小波变换和自相关算法提取的回波信号包络曲线。改变包络提取算法的参数以获得更加平滑、准确的包络曲线。经过多次实验,确定了合适的小波变换与自相关算法的参数:提取原频包络时,自相关算法取延时量为 5 个采样点;进行 32 尺度的复 Morlet 小波变换,取第 5 个尺度的小波系数。提取差频包络时,自相关算法取延时量为 12 个采样点;进行 32 尺度的复 Morlet



(a) 原频信号

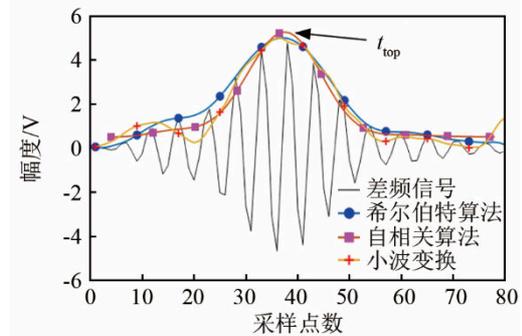


(b) 差频信号

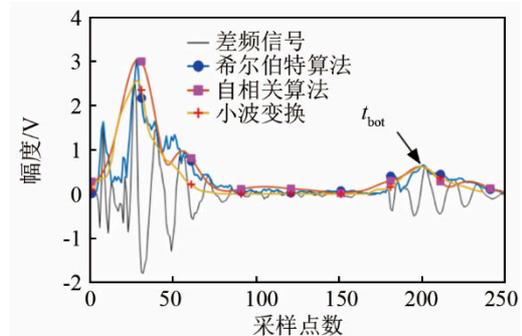
图 5 水池试验得到的双通道回波信号

Fig.5 The dual-channel echo signals from pool test

包络提取结果如图 6 所示。由于原频信号是窄带信号,因此 3 种方法提取原频包络的差异并不明显。对于差频信号,希尔伯特变化存在较多突刺,小波变换与自相关算法的曲线更加平滑,同时自相关算法的峰值点误差略小于小波变换。



(a) 原频信号包络提取



(b) 差频信号包络提取

图 6 不同包络提取方法的比较(水池试验数据)

Fig.6 Comparison of different envelope extraction methods according to pool test data

小波变换,取第 20 个尺度的小波系数。

采集了 160 组回波信号,采用第 2 节中的测厚算法计算仿体厚度, k_p 和 k_d 分别取值为 20 dB 和 16 dB,仿体厚度为 10.00 cm。由于仿体厚度是固定值, L_{max} 和 L_{min} 的取值间隔不需太大,分别取值为 11.00 cm 与 9.00 cm。该试验还比较了三种包络提取方法单独使用时的测厚结果,测厚误差与方差的统计信息如表 2 所示。当三种包络提取方法单独使用时,小波变换的测厚误差较小,且结果较为稳定。采用希尔伯特变换提取表面回波包络,自相关算法提取底面回波包络的测厚误差最小,且结果最稳定。

表 2 不同方法测厚结果的统计信息(水池试验数据)
Table 2 Thickness estimation of different methods according to pool test data

包络提取算法	绝对误差/mm	标准差/mm
希尔伯特变换	4.32	0.79
小波变换	1.78	0.26
自相关算法	1.55	0.22
自相关+希尔伯特	1.40	0.18

3.2 海试试验

2018 年, 在西太平洋开展了中国大洋某航次对富钴结壳的勘探工作, 使用原位探测器采集了多个站点的富钴结壳的回波信号。本节给出了其中一个站点的回波信号的处理结果。

采集到的两个通道的信号如图 7(a)和图 7(b)所示。采样的时间为 1 ms, 图中虚线部分为实际的回波信号。

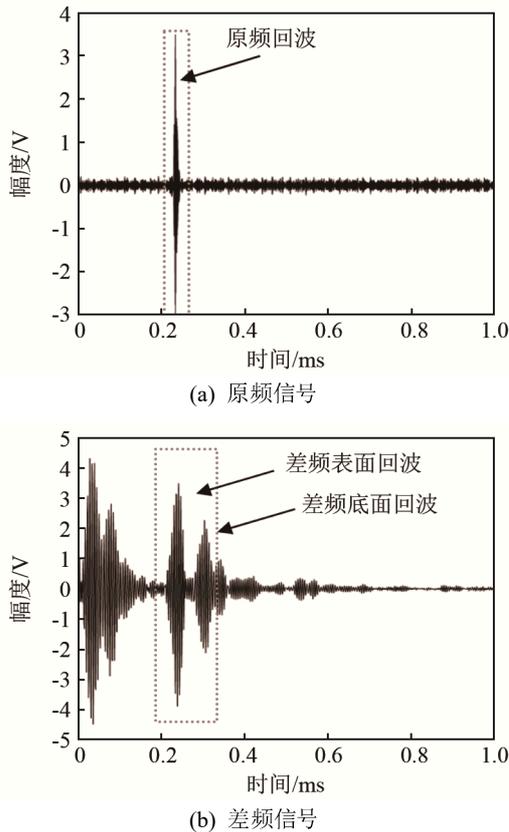
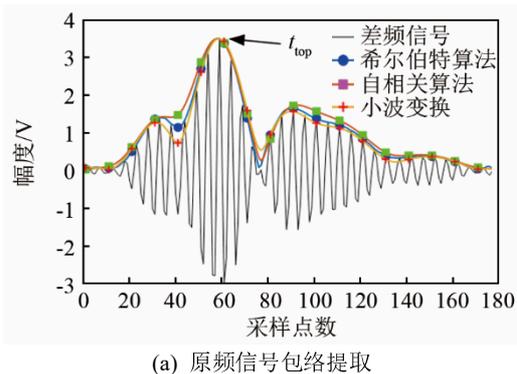
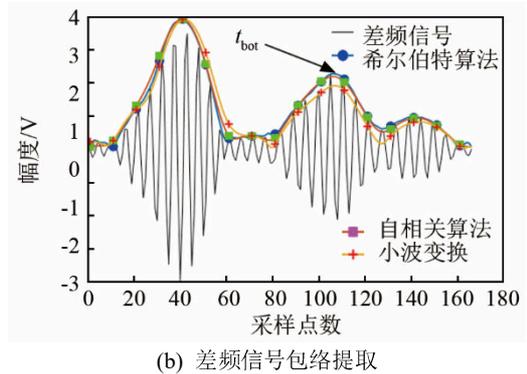


图 7 海试得到的双通道回波信号
Fig. 7 The dual-channel echo signals from sea trial

三种方法的包络提取结果如图 8 所示。提取原频包络时, 自相关算法取延时量为 5 个采样点; 做 32 尺度的复 Morlet 小波变换, 取第 10 个尺度的小波系数。提取差频包络时, 自相关算法取延时量为 8 个采样点; 做 32 尺度的复 Morlet 小波变换, 取



(a) 原频信号包络提取



(b) 差频信号包络提取

图 8 不同包络提取方法的比较 (海试数据)

Fig. 8 Comparison of different envelope extraction methods according to sea trial data

第 10 个尺度的小波系数。

选取了 160 组海试数据, 采用第 2 节中的测厚算法测量结壳厚度, k_p 和 k_d 分别取值为 20 dB 和 16 dB, L_{max} 和 L_{min} 取值分别为 30.00 cm 与 5.00 cm, 实际测得富钴结壳的声速为 $3\ 000\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。同水池试验一样, 比较了 3 种包络提取方法单独使用时的测厚结果, 厚度与方差的统计信息如表 3 所示。结果显示, 采用希尔伯特算法提取表面回波时间, 自相关算法提取底面回波测得的平均厚度为 9.33 cm, 并且该方法的测量标准最小, 为 5.28 mm。

表 3 不同方法测厚结果的统计信息 (海试数据)
Table 3 Thickness estimation of different methods according to sea trial data

包络提取算法	平均厚度/cm	标准差/mm
希尔伯特变换	10.09	11.82
小波变换	9.21	6.24
自相关算法	9.15	5.41
自相关+希尔伯特	9.33	5.28

4 结 论

本文介绍了原位探测器并基于该系统提出了富钴结壳原位测厚算法。首先分别提取结壳表面原频回波信号与结壳底面差频回波信号的包络; 然后确定结壳表面、底面回波的到达时刻, 最后通过时延差法测量结壳厚度。其中, 包络提取算法影响着测厚精度, 在实验室水池中, 通过仿体分析了不同包络提取算法的厚度测量误差。实验结果表明, 希尔伯特变换适用于原频信号的包络提取, 而自相关算法与小波变换适用于差频信号的包络提取。当采用希尔伯特变换与自相关算法分别提取原频信号与差频信号的包络时, 得到的测厚结果误差最小且最稳定。随后, 将该算法应用于大洋某航次的海试数据, 成功测得了富钴结壳的厚度, 验证了该算法

的可行性。

在后续工作中, 将研究沉积物-富钴结壳-基岩的多层底质结构的测厚算法。鉴于原位探测器在测厚工作中的成功应用, 今后将研究基于原位探测器的富钴结壳的识别算法。

参 考 文 献

- [1] COMMEAU R, CLARK A, MANHEIM F, et al. Ferromanganese crust resources in the Pacific and Atlantic oceans[C]//OCEANS 1984. Washington, DC, USA. IEEE, 1984: 421-430.
- [2] USUI A, GRAHAM I J, DITCHBURN R G, et al. Growth history and formation environments of ferromanganese deposits on the Philippine Sea Plate, northwest Pacific Ocean[J]. *Island Arc*, 2007, **16**(3): 420-430.
- [3] 武光海, 周怀阳, 陈汉林. 大洋富钴结壳研究现状与进展[J]. *高校地质学报*, 2001, **7**(4): 379-389.
WU Guanghai, ZHOU Huaiyang, CHEN Hanlin. Progress in the research of cobalt-rich crusts[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2001, **7**(4): 379-389.
- [4] 王润田. 海底声学探测与底质识别技术的新进展[J]. *声学技术*, 2002, **21**(Z1): 96-98.
WANG Runtian. Progress in detecting the geological formations and sediment properties by sound[J]. *Technical Acoustics*, 2002, **21**(Z1): 96-98.
- [5] 金翔龙. 海洋地球物理研究与海底探测声学技术的发展[J]. *地球物理学进展*, 2007, **22**(4): 1243-1249.
JIN Xianglong. The development of research in marine geophysics and acoustic technology for submarine exploration[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, **22**(4): 1243-1249.
- [6] 胡梦涛, 李太春, 廖荣发, 等. 参量阵浅剖探测技术在海底管线探测中的应用[J]. *海洋测绘*, 2019, **39**(5): 30-34.
HU Mengtao, LI Taichun, LIAO Rongfa, et al. Application of parametric array sub-bottom profile detection technology in pipeline detection[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2019, **39**(5): 30-34.
- [7] 邹彬彬, 陈晶晶, 王润田. 宽带参量阵技术在近海探测中的研究[J]. *声学学报*, 2016, **41**(6): 797-803.
ZOU Binbin, CHEN Jingjing, WANG Runtian. Research on wideband parametric acoustic arrays used in shallow water detection[J]. *Acta Acustica*, 2016, **41**(6): 797-803.
- [8] 李兴勇, 陈宇茹, 何龙富, 等. 基于参量阵的多波束测深技术研究[J]. *电子设计工程*, 2016, **24**(20): 118-120.
LI Xingyong, CHEN Yuru, HE Longfu, et al. Research on multi beam depth measurement technology based on parametric array[J]. *Electronic Design Engineering*, 2016, **24**(20): 118-120.
- [9] THORNTON B, ASADA A, BODENMANN A, et al. Instruments and methods for acoustic and visual survey of manganese crusts[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013, **38**(1): 186-203.
- [10] THORNTON B, ASADA A, URA T, et al. The development of an acoustic probe to measure the thickness of Ferro-manganese crusts[C]//OCEANS'10 IEEE SYDNEY. Sydney, NSW, Australia. IEEE, 2010: 1-9.
- [11] 滕艳菲, 陈尚松. 超声波测距精度的研究[J]. *国外电子测量技术*, 2006, **25**(2): 23-25.
TENG Yanfei, CHEN Shangsong. Study on precision of ultrasonic ranging[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2006, **25**(2): 23-25.
- [12] HONG, FENG, HUANG, et al. China's first demonstration of cobalt-rich manganese crust thickness measurement in the western Pacific with a parametric acoustic probe[J]. *Sensors*, 2019, **19**(19): 4300.
- [13] HONG F, FENG H H, HUANG M Y, et al. An effective method for measuring the thickness of Cobalt-rich Manganese Crust based on the neighborhood information and dual-channel information [C]//International Congress on Acoustics, 2019: 4446-4453.
- [14] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, **454**(1971): 903-995.
- [15] SHENSA M J. Discrete inverses for nonorthogonal wavelet transforms[C]//SPIE's International Symposium on Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing. Proc SPIE 2242, Wavelet Applications, Orlando, FL, USA. 1994, **2242**: 314-324.
- [16] 毕果, 陈进, 何俊, 等. 基于相关分析的包络技术在齿轮特征信息识别中的应用[J]. *机械科学与技术*, 2007, **26**(4): 408-411.
BI Guo, CHEN Jin, HE Jun, et al. Application of correlation analysis-based envelope technique to gear character identification[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2007, **26**(4): 408-411.
- [17] 李允武. 研究海底物理特性的声学方法[J]. *海洋技术*, 1982, **1**(1): 10-17.
LI Yunwu. Acoustic methods for investigation of the physical characteristics of sea bottom[J]. *Ocean Technology*, 1982, **1**(1): 10-17.