

多频三维合成孔径声呐在海上风电电缆勘测中的应用

The Application of Multi-frequency Three-dimensional Synthetic Aperture Sonar in Offshore Wind Power Cable Survey

刘维 刘顺发 任申真

Wei Liu Shunfa Liu Shenzhen Ren

中科探海（深圳）海洋科技有限责任公司 中国·广东 深圳 518000

Zhongke Exploration (Shenzhen) Marine Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

摘要：海上风电电缆的挖沟埋设方式增加了勘测工作的难度，传统声呐的勘测能力不能同时满足大范围对掩埋线缆进行成像并且获得掩埋线缆的深度信息的要求。近年来出现的三维合成孔径声呐可以解决掩埋电缆勘测中遇到的上述问题，一次勘测就可以对掩埋电缆生成连续的路由图像，并获得掩埋电缆的深度和埋深信息。全球范围内具有成功商业应用的设备厂商只有加拿大 PanGeo 和中国中科探海两家企业。论文对中科探海生产的多频三维合成孔径声呐在海上风电电缆勘测中的应用进行简要介绍。

Abstract: The digging and burying method of offshore wind power cables increases the difficulty of survey work, and the survey ability of traditional sonar cannot simultaneously meet the requirements of imaging of buried cables and obtaining the depth information of buried cables. The three-dimensional synthetic aperture sonar appeared in recent years can solve the above problems encountered in the buried cable survey. A survey can generate continuous routing images of the buried cable, and obtain the depth and depth of the buried cable. There are only two equipment manufacturers with successful commercial applications, Canada PanGeo and China China. This paper briefly introduces the application of multi-frequency three-dimensional synthetic aperture sonar produced by Zhongke Exploration in offshore wind power cable survey.

关键词：多频三维合成孔径声呐；海上风电电缆勘测；掩埋电缆成像；深度和埋深信息

Keywords: multi-frequency three-dimensional synthetic aperture sonar; offshore wind cable survey; buried cable imaging; depth and depth information

DOI: 10.12346/peti.v5i2.8009

1 引言

在海洋环境中，低频信号能够穿透海底的疏松底层，对海底地层以下的掩埋目标进行成像；高频信号则因为易被反射的特点，可以对地形和水深数据进行高精度的测量。多频三维合成孔径声呐通过高低频信号的不同特点，对海底掩埋物（如电缆）进行成像、深度测量，并综合海底地形的水深，最终计算得出掩埋物的埋深数据。

海上风电是目前最有前景的新能源开发计划之一。海洋上风力资源较陆地上更加丰富、风速更加恒定；海上位置宽阔，能够安装更大装机容量的大型机组；而且离岸风电桩也

减少了噪声对居民生活的影响。随着化石燃料的负面影响日益突出，开发清洁能源的重要性也日益受到国际社会的重视^[1]。围绕碳达峰、碳中和，和深化新旧动能转换的发展方向，中国的海上风电开发也在政策的大力支持下迅猛发展。

海上风电桩通过海底电缆将产生的电力输送回岸上电网。为保护电缆在海洋环境下的安全，一般将电缆埋在缆沟内并用沙土覆盖起来。这种挖沟埋设的铺设方式可以有效地避免海底电缆因为船只落锚、渔业拖网，洋流影响和水温变化对其造成的破坏^[2]。

海洋的环境决定了海底电缆的安装和维护将会比陆地上

【作者简介】刘维（1980-），男，中国河北邢台人，博士，副研究员，从事水声工程、水下机器人研究。

更困难。实际作业中迫切需要一种能够进行大范围高效率的勘测方式，在不破坏海底掩埋覆盖物的情况下就能获得掩埋电缆的详细测深数据给海底电缆的安装维护提供数据支持。多频三维合成孔径声呐可以直接解决海上风电电缆勘测的痛点问题，其具有的操作简便、数据精确、结果可视化的优势使得多频三维合成孔径声呐在海上风电电缆勘测工作中有巨大的应用潜力。

2 多频三维合成孔径声呐

多频三维合成孔径声呐的大范围和高分辨率成像能力使其在掩埋电缆勘测中具有不可替代的优越性能。

声呐设备一般沿着电缆施工图上的路由轨迹进行勘测作业，由于掩埋电缆受到施工条件、外力破坏的影响，使得掩埋电缆的实际位置有可能偏离施工图。实际勘测时需要设备具有大范围区域成像能力，来防止掩埋因为位置变动脱离成像区域，导致线缆部分段落的信息缺失。

高分辨率的三维图像保证了多频三维合成孔径声呐对电缆等细小目标的分辨能力，使得三维图像结果中，电缆形状连续、特征清晰，易于辨认。防止电缆位于成像范围内却因为尺寸过小，不能被识别，而导致的信息缺失。

在实际勘测运用中，声呐沿预设的轨迹对海底区域进行大范围的勘测并生成三维图像，在采集到的三维图像数据中对电缆等小目标进行拾取、定位，之后对三维图像中线缆路由所在位置进行截面处理，生成电缆的连续路由位置的图像，并获得对应的水深数据。

3 中国和其他国家应用现状

因为合成孔径声呐的优异性能，其在海底掩埋管线探测、海底矿物探测、海底设施建设选址等方面的潜力已在国际上引起重视。多国对掩埋物的声学探测都进行了实验研究，例如美国研究者在 2004 年进行了 BOSS 系列（掩埋物探测合成孔径声呐）运用 3kHz 的 LFM 信号进行掩埋物探测取得成功，但是该方法只能透视掩埋层，获得掩埋物体的二维图像，并不能得到目标的埋深信息^[1]。

目前进行掩埋物探测的三维声呐的成熟商用机只有加拿大 Pangeo 公司的 SBI（Sub-Bottom Imager）和中国中科探海的多频三维合成孔径声呐系统。Pangeo 公司的 SBI 通过接收线阵、惯性导航仪和多普勒测速仪等硬件设备可以获得分辨率 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的图像，能够探测设备以下 5m 距离的掩埋物体。中科探海的设备通过接收面阵、卫星导航仪惯性导航仪和声速剖面仪等硬件设备可以获得最大分辨率 $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 的图像，探测掩埋深度可以达到 20m，对于 5cm 的掩埋电缆的最大探测深度可以达到 $10\text{m}^{[4]}$ 。

4 基本原理

多频三维合成孔径声呐中多频是指声呐的物理特性，三

维合成孔径是指声呐成像过程中应用的算法原理。

多频三维合成孔径声呐可以工作在不同的声波信号频率段。在高频段，设备获得清晰的地形图和精确的水深。在低频段，设备利用声波的穿透性对掩埋层中的掩埋线缆成像，并用三维合成孔径算法提高图像的分辨率，来生成勘测区域高分辨率的三维图像。通过结合高频的水深数据和低频的深度信息，最终可以得到掩埋线缆的埋深数据和线缆的连续路由图像。

三维合成孔径是在二维合成孔径算法基础上的改进算法，二维合成孔径算法经过多年发展已基本成熟。合成孔径算法通过融合声呐在运动轨迹上不同位置的接收信号，来模拟声呐孔径尺寸的增加。声呐的阵列越长，声呐的成像分辨率就越高，运用合成孔径算法可以获得大幅提高分辨率的声学图像，而且合成孔径算法的分辨率理论上不受距离影响而发生恶化。三维合成孔径算法区别于二维合成孔径算法体现在：①合成孔径数据从线阵拓展为面阵；②距离徙动补偿从平面双曲线变为三维双曲面。

5 系统组成

多频三维合成孔径声呐由发射阵列、接收面阵、发射机、接收机、数据交换模块和金属结构件组成入水工作的湿端；由信号处理分系统、显示控制分系统、误差补偿分系统、供电模块、数据交换模块组成在船舱内工作的干端。湿端工作时采集的数据通过光缆和光电交换机和船上干端相连接，干端设备对采集到的回波数据进行处理生成三维图像并将回波数据和结果数据进行保存。

干端各系统的处理主要包括：①误差补偿分系统内进行声呐运动误差估计和补偿以及声线跟踪来减少浪涌潮位和声速变化对三维图像和计算结果的影响；②信号处理分系统中对误差补偿后的数据进行三维合成孔径成像处理生成高分辨率的三维图像数据和线缆的路由位置数据和线缆的深度数据；③在显示控制分系统上显示海底电缆的三维连续路由图像和路由各位置对应的精确埋深信息。

多频三维合成孔径声呐系统有实时成像和后处理成像两种模式。实时成像牺牲了图像的部分精度来提升成像速度；后处理成像过程计算复杂，运算量大，需要很长的运算时间但是后处理得到的三维图像结果精确、分辨率高。

实时成像功能可以帮助作业员判断勘测区域内是否有疑似掩埋线缆等作业现场信息。后处理成像则一般应用于勘测结束后，通过融合采集到的大量数据来生成高质量的勘测结果图像。

6 海上风电勘察中的难点

6.1 低频率和高分辨率的矛盾

高分辨率和掩埋探测的两项性能对声呐信号频率的要求是矛盾的，在采用低频信号时合成孔径技术是一种提高声呐

图像分辨率的高效手法。虽然通过增大信号的发射强度可以调和穿透性和分辨率的矛盾,但是声呐性能受到工程条件和物理条件的制约也不能无限制地增大发射功率,过大的发射功率会使发射器表面产生气泡或局部真空从而影响信号发射。

为了达到声呐的最佳性能指标需要综合各方面的因素和条件,目前采用的三维合成孔径技术,是在低频声波的强穿透能力和声呐图像的高分辨率的调和取得理想结果的最有效的手段。

6.2 掩埋风电电缆的复杂工况

掩埋风电电缆在海底的状况复杂,不仅使得电缆掩埋/裸露等状态导致对于设备成像能力的不同要求。电缆的移位,掩埋层破坏,电缆自身被破坏等因素也是勘测过程中希望得到的细节信息。

多频三维合成孔径声呐视可以获得全海深覆盖的水体、海底地形面、海底底质层中掩埋目标的海洋全景数据。在全景数据中可以得到掩埋线缆的连续路由图像和埋深信息,这些数据不仅可以为海底电缆的维修施工提供工程上的位置信息,而且可以检查电缆是否发生断裂变形、是否暴露于海水、掩埋深度和位置是否和设计规划一致等情况。

6.3 误差的修正与补偿

多频三维合成孔径声呐的子阵数量多,构造复杂;运动补偿需要对各子阵的运动数据进行全面进行补偿才能保证成像的效率和精度。声呐在工作中必定包含潮位、浪涌等环境因素对平台的位置干扰误差,而传统声呐的运动补偿方法一般基于一维和二维成像处理而无法直接适用于三维合成孔径声呐。另外水体和掩埋层的声速不均导致的声线弯曲,浅水深情况下的多途径传播产生的干扰也会影响结果的准确性和三维图像的质量。

因此以运动补偿和声速修正为代表的应用场景,要求更高效、更新颖的技术和方法来提升多频三维合成孔径图像结果的精度。

6.4 运算和工作效率的提升

三维合成孔径算法计算复杂,运算量大,通常后处理计算时间很长。如何在降低结果精度的前提下缩短后处理时间,例如算法的改进、硬件设备的提升、采用多通道大规模的并行处理算法等一些方案也被提上议程。

目前对于多频三维合成孔径声呐的结果判别,部分需要依赖于人工辅助,这加大了操作人员的负担,也延长了数据

处理的时间周期。如何提高数据处理的自动化程度,开发高准确率的智能目标识别方法,来提高工作效率也是今后多频三维合成孔径技术的发展方向之一。

7 不同工况下的勘察结果

在高频合成孔径声呐生成的地形图右侧有一段裸露管线,而在图中左侧没有明显的线缆目标。在低频三维合成孔径生成的地质图中可以看到图中左侧的地质层中也存在一段掩埋线缆,并且可以根据图像颜色得到该段线缆的深度信息。

在低频三维合成孔径声呐的地质图中红色路由段代表裸露线缆,由于低频三维合成孔径声呐区分掩埋/裸露段的准确性还有不足。通过结合高频合成孔径声呐的信息,可以得到线缆掩埋/裸露部分的准确状态和埋深信息。

8 结语

综上所述,多频三维合成孔径声呐在海上风电电缆勘测中具有广泛的应用前景。通过其先进的成像能力和获得深度和埋深信息的功能,可以有效地解决传统声呐勘测中的限制和难点,提高勘测效率和数据质量。中科探海作为中国唯一一家生产多频三维合成孔径声呐的企业,为中国在海洋工程领域的发展和可再生能源的推广做出了积极的贡献。希望论文对多频三维合成孔径声呐在海上风电电缆勘测中的应用进行的简要介绍,能够为相关领域的研究和实际应用提供有价值的参考。

参考文献

- [1] Glenn Wright, Raza Ali Mehdi, Michael Baldauf. 3-dimensional Forward Looking Sonar: Offshore wind farm applications improving the safety & reliability of offshore wind farms[J]. 2016 European Navigation Conference (ENC 2016),2016:1-8.
- [2] 罗耀文,高伟,秦磊,等.ROV在海管后挖沟中的应用[J].化工管理,2016(26):137-138.
- [3] SG Shock. Synthetic aperture 3D buried object imaging[J]. Underwater technology: International journal of the society for underwater technology,2008,27(4):185-193.
- [4] Quesson B, Groen J. Interferometric synthetic aperture sonar with an autonomous vehicle for 3D imaging of the seafloor[J]. 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar: 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2012),2012,82-84.