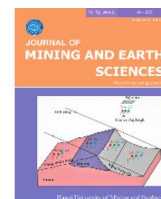




Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <http://jmes.humg.edu.vn>



Research using seismic waves for orientation of the Ocean - Bottom Seismographs



Hung Danh Tran ^{1,*}, Huong Thien Phan ¹, Ting Yang ²

¹ Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

² Southern University of Science and Technology, Shenzhen, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18th Nov. 2020

Revised 09th Mar. 2021

Accepted 02nd Apr. 2021

Keywords:

East Sea,
OBS devices,
OBS orientation,
Ocean - Bottom Seismograph.

ABSTRACT

Orientation of the Ocean-Bottom Seismograph (OBS) devices is an important task that must complete before using these data. While the OBS direction is determined correctly, we can correct the rotation angle of the coordinate system so that we obtain the maximum amplitude seismic signals for different seismic waves. In this article, we present the method using seismic waves to determine the direction of the OBS. The results obtained from 11 OBSs in the East Sea show that these stations have misdirected from different angles. This method has advantage with high reliability. Specially, we can widely apply for the OBS devices in other oceans.

Copyright © 2021 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: trandanhhung@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2021.62(2).08



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



Nghiên cứu sử dụng sóng địa chấn trong định hướng cho các trạm địa chấn dưới đáy biển

Trần Danh Hùng^{1,*}, Phan Thiên Hương², Ting Yang²

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

² Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Phương Nam, Thành Quyên, Trung Quốc

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 18/11/2020

Sửa xong 09/3/2021

Chấp nhận đăng 02/4/2021

Từ khóa:

Biển Đông,
Định hướng trạm địa
chấn,
Thiết bị OBS,
Trạm địa chấn đáy biển.

TÓM TẮT

Việc định hướng cho các thiết bị địa chấn đáy biển OBS (Ocean - Bottom Seismograph) là một nhiệm vụ rất quan trọng, cần được hoàn thiện để có thể sử dụng được các số liệu này. Khi xác định đúng phương hướng của các thiết bị này, ta có thể xoay hiệu chỉnh hệ tọa độ giúp thu được các tín hiệu địa chấn có biên độ lớn nhất cho các loại sóng địa chấn khác nhau. Trong bài báo này nhóm tác giả trình bày phương pháp sử dụng sóng địa chấn để xác định phương hướng cho các trạm địa chấn đáy biển OBS. Các kết quả thu được từ 11 trạm địa chấn đáy biển ở Biển Đông cho thấy toàn bộ các trạm này đều bị sai hướng với các góc khác nhau. Phương pháp này có nhiều ưu điểm với độ tin cậy cao. Trên cơ sở các kết quả đạt được cho thấy phương pháp này có thể áp dụng rộng rãi cho tất cả các thiết bị địa chấn đáy biển OBS ở các vùng biển khác nhau.

© 2021 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Ba thành phần trục tọa độ của trạm địa chấn bất kỳ đều đòi hỏi phải được lắp đặt theo các hướng quy định của hệ tọa độ đã định trước như: trục X theo hướng đông, trục Y theo hướng bắc và trục Z theo phương thẳng đứng. Đối với công tác lắp đặt các trạm địa chấn trên đất liền thì công việc định hướng cho thiết bị chủ yếu dựa vào việc sử dụng la bàn/địa bàn. Tuy nhiên, đối với việc định hướng cho các trạm địa chấn dưới đáy biển OBS (Ocean - Bottom Seismograph) thì việc định

hướng lại vô cùng khó khăn. Vì vậy, khi triển khai thực địa trên biển thì các thiết bị này được thả rơi tự do xuống đáy biển mà không thể định hướng trước đó và cũng không biết thiết bị đã quay theo hướng nào? Mặt khác, khi thiết bị ở dưới đáy đại dương sâu vài nghìn mét thì việc định hướng trong điều kiện này là rất khó khăn và gần như không thể tiến hành.

Việc xác định sai hướng của trạm OBS ảnh hưởng lớn đến các nghiên cứu đòi hỏi sử dụng cả 3 thành phần của các tài liệu địa chấn này. Cụ thể theo các hướng khác nhau thì vận tốc các sóng địa chấn truyền đến máy thu cũng khác nhau và mỗi loại sóng địa chấn có phương thức lan truyền khác nhau gây sai lệch việc nhận dạng và xác định đúng thời gian sóng đến, dẫn tới việc xác định sai vận tốc truyền sóng, sai vị trí của các chấn tâm,...

*Tác giả liên hệ

E - mail: trandanhhung@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2021.62(2).08

Biên độ thu được của các sóng địa chấn theo các hướng khác nhau cũng khác nhau, thậm chí không thu được tín hiệu mong muốn. Vì thế, đây là một trong những nhiệm vụ khó khăn đối với việc sử dụng số liệu của các trạm địa chấn đặt dưới đáy biển OBS. Xuất phát từ thực tế kể trên, việc nghiên cứu sử dụng sóng địa chấn để định hướng cho các OBS nhằm hiệu chỉnh những sai lệch về hướng của thiết bị là việc làm cần thiết và có ý nghĩa vô cùng to lớn, giảm chi phí trong quá trình thi công, triển khai thực địa khi thả thiết bị xuống biển.

Ngày nay, các trạm địa chấn đáy biển được sử dụng một cách rộng rãi phục vụ các nghiên cứu cấu trúc sâu của trái đất. Số liệu địa chấn thu được từ các thiết bị địa chấn đáy biển cũng ngày càng phong phú, đa dạng, do có sự đầu tư để nghiên cứu cấu trúc sâu vỏ đại dương. Các thiết bị này cần phải được định hướng cho cả 3 thành phần X , Y , Z của trạm địa chấn.

Trên thế giới việc sử dụng số liệu địa chấn từ các trạm OBS để nghiên cứu cấu trúc lớp vỏ đại dương và các ranh giới địa chất dưới sâu của trái đất đã được nghiên cứu từ khá sớm. Từ năm 1992, các nhà khoa học Pháp đã triển khai thành công các thử nghiệm lắp đặt các trạm OBS ở phía bắc Đại Tây Dương và được công bố trong công trình của Montagner và nnk. (1994). Năm 1995, tiếp tục có những thử nghiệm điện từ và chụp cắt lớp bởi các thiết bị địa chấn đáy biển được ghi liên tục trong vòng 7 tháng để nghiên cứu chi tiết cấu trúc bên dưới đới tách giãn đáy đại dương MOR (Mid - Ocean Ridges). Các kết quả sử dụng dữ liệu OBS từ thử nghiệm này đã được công bố trong công trình của Forsyth và nnk. (1998).

Bằng cách sử dụng chụp cắt lớp sóng mặt từ số liệu OBS như nghiên cứu của Forsyth và Li (2005) để nghiên cứu tính bất đẳng hướng trong cấu trúc thạch quyển. Nhiều nghiên cứu tiếp sau đó cũng được thực hiện bằng cách triển khai các thiết bị đáy biển OBS nguồn bị động trong thời gian dài. Các thử nghiệm tập trung vào nghiên cứu cấu trúc địa chất của các khu vực MOR.

Các cuộc thử nghiệm thiết bị OBS có quy mô lớn và kéo dài nhiều năm trên khu vực "Cascadia Initiative" ở Đông Bắc Thái Bình Dương ngoài khơi Bắc Mỹ mà hiện nay vẫn đang tiếp tục diễn ra và đây là nguồn số liệu miễn phí quý giá phục vụ cho các nghiên cứu lớp vỏ đại dương và cấu trúc sâu trong khu vực này (Baker & Stevens, 2004; Ramachandran và nnk., 2006; Brillon và nnk.,

2013; Audet, 2016). Tuy nhiên, những nghiên cứu này đã cho thấy những khó khăn trong việc sử dụng tài liệu OBS do mức độ nhiễu lớn, do dòng chảy ngầm (Crawford & Webb, 2000; Bell và nnk., 2015), hay do ảnh hưởng bởi địa hình dốc, đặc biệt sự sụt lún đáy biển có thể làm nghiêng các thiết bị gây trở ngại cho quá trình thu nhận tín hiệu địa chấn (Crawford & Webb, 2000; Dahm và nnk., 2006; Bell và nnk., 2015; Hùng và nnk., 2019).

Khu vực thử nghiệm các thiết bị địa chấn đáy biển OBS sử dụng trong nghiên cứu này được triển khai ở phần trung tâm của Biển Đông với 2 đợt vào các năm 2012 và 2014 (Hình 2).

Biển Đông có diện tích khoảng 3,5 triệu km^2 , nằm ở phía Đông Việt Nam, phía Tây đảo Luzon và phía Bắc đảo Borneo. Nó được bao quanh bởi bốn cấu trúc kiến tạo chính bao gồm đảo Đài Loan, vòng cung Lô châu (Luzon), bán đảo Đông Dương và khối phía Nam Trung Quốc. Về cấu trúc địa chất của Biển Đông rất phức tạp, bao gồm lớp vỏ lục địa ở phía Tây Bắc và phía Nam, và lớp vỏ đại dương ở phần trung tâm. Ranh giới phần vỏ lục địa và vỏ đại dương nằm gần trùng với vị trí của đường đẳng sâu -3000 m. Theo các nghiên cứu tài liệu đo dị thường Từ đáy biển (Briaies và nnk. 1993; Li và nnk., 2014) và các kết quả khoan của chương trình Khám phá Đại dương Quốc tế 349 cho thấy tốc độ tách giãn đáy Biển Đông thay đổi trong khoảng từ 20÷80 mm/năm và trong giai đoạn khoảng từ 35÷15,5 triệu năm để hình thành lớp vỏ đại dương với trục tách giãn theo hướng gần Đông - Tây.

Các kết quả của nghiên cứu này có ý nghĩa thực tiễn cao, có thể nói là lần đầu tiên được thực hiện ở nước ta. Mở ra hướng nghiên cứu mới trong tương lai, cho các trạm địa chấn đáy biển được lắp đặt ở Việt Nam. Các thiết bị OBS này có thể đặt dưới chiều sâu khoảng 4000÷5000 m đòi hỏi những yêu cầu kỹ thuật cao nên cần được quan tâm đầu tư một cách đúng mức trong thời gian tới.

2. Phương pháp nghiên cứu và số liệu địa chấn

2.1. Phương pháp định hướng dùng sóng địa chấn

Trong nghiên cứu này nhóm tác giả sử dụng sóng mặt Rayleigh để định hướng cho các trạm địa chấn đáy biển. Sóng địa chấn Rayleigh đến từ các trận động đất được ghi lại ở cả 3 thành phần X , Y , Z của máy thu địa chấn, tuy nhiên biên độ của sóng Rayleigh có sự thay đổi theo các hướng khác nhau.

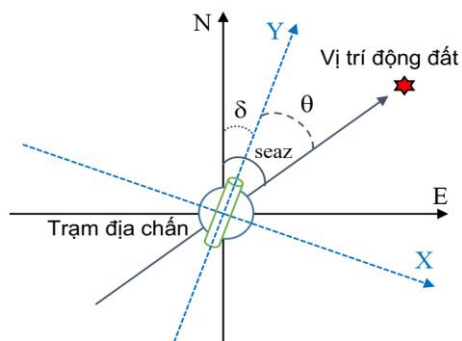
Cụ thể, theo hướng sóng đến hay hướng xuyên tâm (*Radial*) thì sóng Rayleigh có biên độ đạt giá trị cực đại và giảm dần theo các hướng xung quanh. Lợi dụng đặc điểm này của sóng Rayleigh mà Stachnik và nnk. (2012) đã sử dụng tính hàm tương quan liên kết giữa thành phần thẳng đứng Z và thành phần R , khi quay 2 thành phần nằm ngang X và Y theo các hướng khác nhau, kết quả hàm tương quan này sẽ đạt giá trị cực đại khi một trong hai thành phần nằm ngang X và Y này trùng với hướng xuyên tâm của trận động đất theo công thức sau:

$$C_{zr} = \frac{S_{zr}}{\sqrt{S_{zz}S_{rr}}} \quad (1)$$

$$\text{Với: } S_{jk} = \sum_{\tau=0}^N X_j(\tau)Y_k(\tau) \quad (2)$$

Với C_{zr} - hàm tương quan liên kết chuẩn hóa của 2 thành phần Z và R và sẽ có giá trị $-1 \div 1$; S_{zr} - hàm tương quan liên kết khi có bước dịch bằng không (zero - lag) của 2 thành phần Z và R ; S_{zz} - hàm tự tương quan khi bước dịch bằng không (0) của thành phần Z ; S_{rr} - hàm tự tương quan khi bước dịch bằng không (0) của thành phần R ; $X_j(\tau)$ $Y_k(\tau)$ - các biến đổi Hilbert của 2 thành phần nằm ngang X và Y .

Hai thành phần nằm ngang X và Y sẽ được xoay tất cả các hướng khác nhau theo chiều kim đồng hồ với bước xoay là 1 độ trong dải baz (back - azimuth) từ $0 \div 360^\circ$ (Hình 1). Khi 2 thành phần này xoay đúng hướng hướng xuyên tâm của trận



Hình 1. Mô hình thể hiện phương pháp định hướng cho trạm địa chấn đáy biển OBS với: N, E - các hướng Bắc và Đông địa lý; Y, X - các thành phần Bắc và Đông của trạm địa chấn; hình ngôi sao - vị trí chấn tâm trận động đất; δ - sai số giữa hướng Bắc của thiết bị và hướng Bắc địa lý $\delta = \text{seaz} - \theta$; seaz - góc back - azimuth của thiết bị; θ - góc back - azimuth xác định trên cơ sở sử dụng sóng địa chấn.

động đất (*Radial*) và hướng tiếp tuyến (*Transverse*) thì giá trị hàm tương quan liên kết giữa 2 thành phần Z và R sẽ đạt giá trị cực đại. Điều đó có nghĩa là ta đã xác định được hướng xoay đúng của trạm địa chấn cũng như góc hiệu chỉnh δ của 2 thành phần nằm ngang X và Y theo công thức sau:

$$\delta = \text{seaz} - \theta \quad (3)$$

Trong đó: X và Y - các thành phần Đông và Bắc của trạm địa chấn; E và N - các hướng Đông và Bắc địa lý; θ - góc back - azimuth xác định được trên cơ sở sử dụng sóng địa chấn; seaz - góc back - azimuth của trạm địa chấn. Từ đó ta tiến hành hiệu chỉnh lại hướng của trạm địa chấn bằng cách xoay lại hướng của các thành phần X và Y của trạm cho trùng với hướng Đông và Bắc địa lý.

2.2. Số liệu OBS

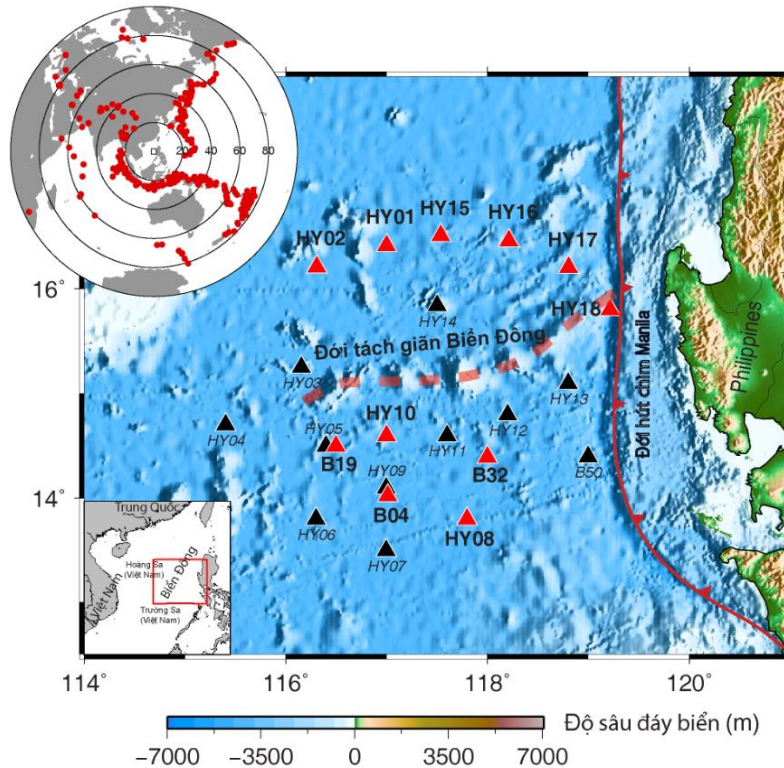
Số liệu địa chấn đáy biển OBS sử dụng trong nghiên cứu này do Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Phương Nam Trung Quốc cung cấp, trên cơ sở 2 đợt thử nghiệm triển khai các trạm OBS tại phía Đông trung tâm Biển Đông vào các năm 2012 và 2014 (Hình 2, Bảng 1). Tổng số 36 trạm OBS được thả xuống đáy biển quanh vị trí đới tách giãn trung tâm Biển Đông. Trong số đó có 17 trạm được trực vớt thành công với 11 trạm địa chấn là có số liệu chất lượng tốt để có thể sử dụng và 6 trạm có chất lượng tài liệu kém. Hầu hết các trạm OBS đặt dưới đáy biển với khoảng thời gian từ 7÷8 tháng, tuy nhiên có 3 trạm OBS chỉ thu được khoảng 3 tháng số liệu do ảnh hưởng của việc bị cạn kiệt năng lượng cũng như hỏng trong suốt quá trình vận hành (Liu và nnk., 2014; Le và nnk., 2018). Do ảnh hưởng của dòng chảy ngầm cũng như sự sụt lún không đều của địa hình đáy biển,... dẫn tới các trạm địa chấn đáy biển có thể bị nghiêng đáng kể ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng các băng ghi, có nhiều trường hợp biên độ của sóng địa chấn bị đảo ngược pha khi gặp góc nghiêng lớn (Hùng và nnk., 2019).

Tập hợp các số liệu địa chấn sử dụng được chọn lọc các trận động đất ở các khoảng cách cách trạm địa chấn từ $20 \div 95^\circ$ và đảm bảo có xuất hiện sóng mặt với biên độ đủ lớn thấy rõ trên băng địa chấn. Sau đó, mỗi trận động đất được xử lý với chiều dài 100 phút tính từ thời điểm xảy ra động đất. Các số liệu này sẽ được lọc tần số thông qua các bộ lọc dải với các tần số thay đổi trong khoảng

từ $0,01 \div 0,1$ Hz để đảm bảo tìm ra được dải tần số phù hợp, mà ở đó sóng mặt có biên độ cao nhất và tỉ số tín hiệu/nhiều là lớn nhất. Sau đó các số liệu sẽ được sử dụng để chạy chương trình xác định góc xoay hiệu chỉnh hướng của trạm địa chấn OBS.

Trong nghiên cứu này nhóm tác giả đã tiến

hành lọc sóng sử dụng dải tần số $0,01 \div 0,1$ Hz để thu được biên độ lớn nhất của sóng Rayleigh trên mỗi mạch địa chấn. Sau đó, tiến hành xác định thời gian đến của sóng Rayleigh sử dụng vận tốc 4 km/s và khoảng cửa sổ thời gian dùng cho phân tích được lấy trước thời điểm sóng đến 30 s và sau thời điểm sóng đến là 600 s.



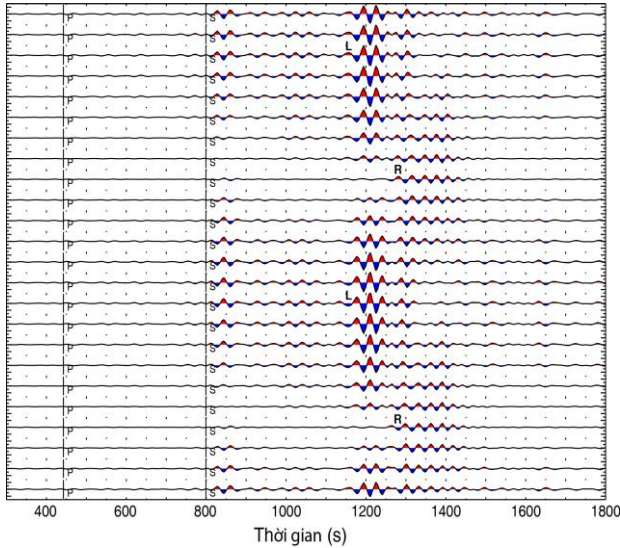
Hình 2. Bản đồ địa hình đáy biển khu vực nghiên cứu tại Biển Đông với 11 trạm OBS là các tam giác màu đỏ với tên trạm được in đậm, các tam giác màu đen với tên trạm được in nghiêng là các trạm OBS bị mất hoặc số liệu có chất lượng kém. Hình tròn phía trên bên trái thể hiện vị trí của các trận động đất được sử dụng.

Bảng 1. Kết quả xác định các góc quay để hiệu chỉnh hướng cho các trạm OBS tại khu vực Biển Đông.

TT	Tên trạm OBS	Kinh độ ($^{\circ}$)	Vĩ độ ($^{\circ}$)	Chiều sâu (m)	Hướng xoay $\theta(^{\circ})$
Năm 2012					
1	HY01	117,0006	16,4054	- 4071	220
2	HY02	116,3061	16,2033	- 3750	20
3	HY08	117,7965	13,8004	- 4104	218
4	HY10	116,9983	14,5989	- 4276	166
5	HY15	117,5370	16,5033	- 3753	154
6	HY16	118,2134	16,4513	- 3920	49
7	HY17	118,8037	16,2010	- 3870	330
8	HY18	119,2166	15,8003	- 4739	20
Năm 2014					
9	B04	117,011	14,0243	- 4245,8	185
10	B19	116,499	14,5006	- 4301,1	350
11	B32	117,999	14,3965	- 3859,2	110

3. Kết quả và thảo luận

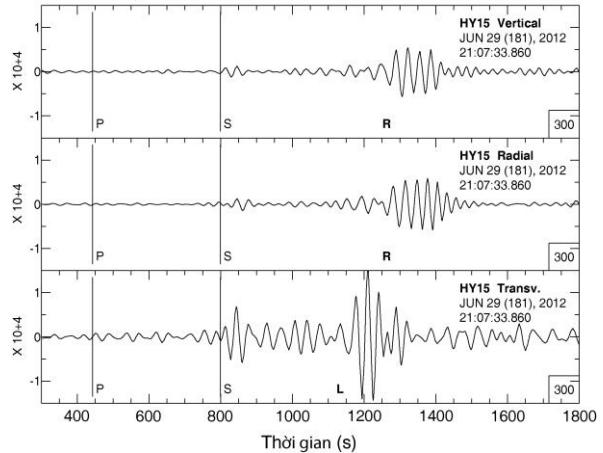
Các kết quả xác định hướng cho 11 trạm OBS trên vùng Biển Đông được đưa ra trong Hình 5 và Bảng 1 cho thấy, cả 11 trạm đều bị lệch hướng đáng kể so với hướng Bắc địa lý với các góc khác nhau. Sau khi tiến hành hiệu chỉnh sẽ thu được sóng Rayleigh xuất hiện trên thành phần xuyên tâm với biên độ cực đại. Trong khi đó biên độ của



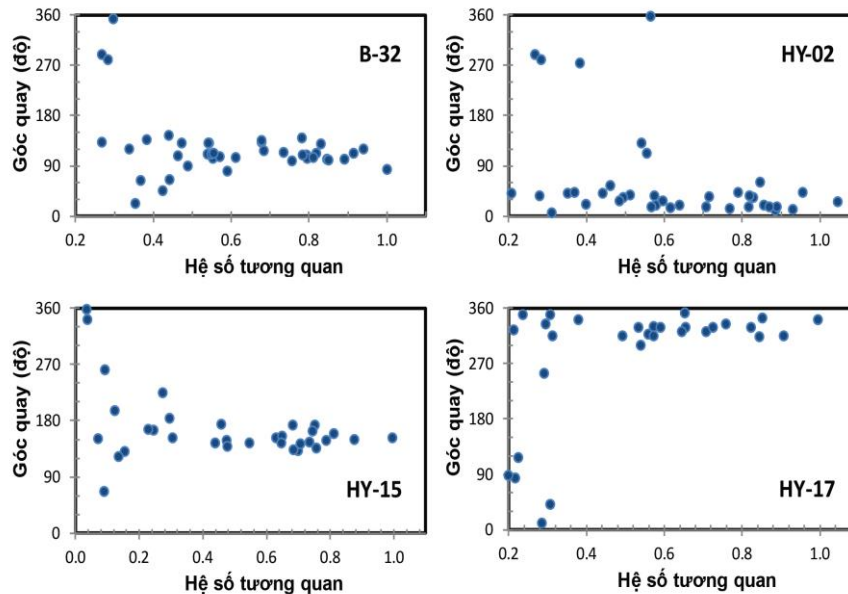
Hình 3. Hình ảnh sóng mặt Rayleigh (R) và Love (L) phân bố trên thành phần xuyên tâm Radial theo các góc xoay (các hướng) khác nhau của trạm địa chấn đáy biển HY15.

sóng Love đạt giá trị cực đại trên thành phần tiếp tuyến (Hình 4).

Hình 3 thể hiện thành phần xuyên tâm với các góc xoay từ $0 \div 360^\circ$ cho thấy vị trí các sóng Rayleigh và sóng Love có biên độ thay đổi ứng với các góc xoay khác nhau. Có thể thấy, tại vị trí góc xoay 150° (vị trí R) biên độ của sóng Love đạt giá trị nhỏ nhất và biên độ sóng Rayleigh đạt giá trị lớn nhất đó chính là vị trí của góc xoay hiệu chỉnh cần xác định. Trên thành phần tiếp tuyến ta sẽ thấy



Hình 4. Ba thành phần: thẳng đứng Z, xuyên tâm R và tiếp tuyến T của trạm địa chấn đáy biển HY15 tại vị trí góc xoay 150° cho thấy sóng Rayleigh xuất hiện trên 2 thành phần thẳng đứng Z và xuyên tâm R, trong khi đó sóng Love lại xuất hiện trên thành phần tiếp tuyến T (hình dưới).



Hình 5. Kết quả xác định góc quay hiệu chỉnh hướng cho các trạm địa chấn đáy biển B32, HY02, HY15 và HY17.

hình ảnh ngược lại. Các kết quả xác định góc xoay hiệu chỉnh tương ứng với các hệ số tương quan liên kết giữa Z và R thể hiện rất tốt, và có sự tương đồng theo tất cả các trận động đất được sử dụng, đặc biệt là những trận động đất mà có hệ số tương quan liên kết lớn. Để xác định góc hiệu chỉnh nhóm tác giả chỉ sử dụng những góc có hệ số tương quan lớn hơn 0,6. Các kết quả xác định hướng xoay hiệu chỉnh cho 11 trạm địa chấn ở khu vực Biển Đông được thể hiện trong Bảng 1.

4. Kết luận

Phương pháp sử dụng sóng địa chấn *Rayleigh* để xác định hướng cho các trạm địa chấn đáy biển OBS là rất có ý nghĩa, mở ra các hướng nghiên cứu tiếp theo trong tương lai. Cụ thể trong thời gian tới cần tiếp tục nghiên cứu sử dụng sóng dọc hoặc/và sóng ngang để định hướng cho các trạm địa chấn đáy biển. Nghiên cứu này cũng là tiền đề để có thể áp dụng sớm trong điều kiện nước ta có vùng biển trải dài, rộng lớn, trong khi các hoạt động nghiên cứu cấu trúc sâu, nghiên cứu các đặc điểm cấu kiến tạo khu vực, tìm kiếm thăm dò khoáng sản và nghiên cứu môi trường đang còn nhiều hạn chế, đòi hỏi những nghiên cứu chi tiết với độ chính xác cao hơn trong tương lai.

Lời cảm ơn

Bài báo là kết quả nghiên cứu của đề tài cấp cơ sở mã số T19 - 39. Tác giả chân thành cảm ơn GS.TS. Tăng Yang trường Đại học Khoa học và Công nghệ Phương Nam (Southern University of Science and Technology), TP. Thâm Quyển, Trung Quốc đã cung cấp các số liệu OBS để thực hiện nghiên cứu này.

Những đóng góp của tác giả

Trần Danh Hùng - tổng quan, phương pháp luận, phân tích số liệu, viết bản thảo bài báo; Phan Thiên Hương, Tăng Yang - góp ý và chỉnh sửa.

Tài liệu tham khảo

- Audet, P. (2016). Receiver functions using OBS data: Promises and limitations from numerical modelling and examples from the Cascadia Initiative. *Geophysical Journal International*, 205(3), 1740-1755.
- Baker, G. E., & Stevens, J. L. (2004). Backazimuth

estimation reliability using surface wave polarization. *Geophysical research letters*, 31(9).

- Bell, S. W., Forsyth, D. W., & Ruan, Y. (2015). Removing noise from the vertical component records of ocean-bottom seismometers: Results from year one of the Cascadia Initiative. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1), 300-313.
- Briaies, A., Patriat, P., & Tapponnier, P. (1993). Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the south China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*, 98(B4), 6299-6328.
- Brillon, C., Cassidy, J. F. & Dosso, S. E. (2013). Onshore/offshore structure of the Juan de Fuca plate in northern Cascadia from Bayesian receiver function inversion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(5), 2914-2920.
- Crawford, W. C. & Webb, S. C. (2000). Identifying and Removing Tilt Noise from Low Frequency (<0.1Hz) Seafloor Vertical Seismic Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(4), 952-963.
- Dahm, T., Tilmann, F. & Morgan, J. P. (2006). Seismic broadband ocean - bottom data and noise observed with free - fall stations: Experiences from long - term deployments in the North Atlantic and the Tyrrhenian Sea. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(2), 647-664.
- Forsyth, D. W. & Li, A. (2005). Array analysis of two-dimensional variations in surface wave phase velocity and azimuthal anisotropy in the presence of multipathing interference. *Seismic Earth: Array Analysis of Broadband Seismograms*, 81 - 97.
- Forsyth, D. W., Webb, S. C., Dorman, L. M. and Shen, Y. (1998). Phase velocities of Rayleigh waves in the MELT experiment on the East Pacific Rise, *Science*, 280, 1235 - 1238.
- Hung, T. D., Yang, T., Le, B. M. & Yu, Y. (2019). Effects of Failure of the Ocean-Bottom Seismograph Leveling System on Receiver

- Function Analysis. *Seismological Research Letters*, 90(3), 1191-1199.
- Le, B. M., Yang, T., Chen, Y. J. & Yao, H. (2018). Correction of OBS clock errors using Scholte waves retrieved from cross - correlating hydrophone recordings. *Geophysical Journal International*, 212(2), 891-899.
- Li, C., Xu, X., Lin, J., Sun, Z., Peleo-Alampay, A., & Tejada, M. (2014). Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(12), 4958-4983.
- Liu, C., Qingfeng Hua, Y. P., Yang, T., Xia, S., Le, B. M., Huo, D. & Huang, Fang Liu, H. (2014). Passive - source ocean bottom seismograph (OBS) array experiment in South China Sea and data quality analyses. *Chinese Science Bulletin*, 59, 4524-4535.
- Montagner, J. P., Romanowicz, B., Bouaricha, S., Lognonne, P., Roullet, G., Thiriot, J. L., & Floc'h, H. (1994). The French pilot experiment OFM - SISMOBS: first scientific results on noise level and event detection. *Physics of the earth and planetary interiors*, 84(1), 321 - 336.
- Ramachandran, K., Hyndman, R. D. & Brocher, T. M. (2006). Regional P wave velocity structure of the Northern Cascadia Subduction Zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(12), 1-15.
- Stachnik, J. C., Sheehan, A. F., Zietlow, D. W., Yang, Z., Collins, J. & Ferris, A. (2012). Determination of New Zealand ocean bottom seismometer orientation via Rayleigh - wave polarization. *Seismological Research Letters*, 83(4), 704-713.