

HIỆU QUẢ CỦA VIỆC SỬ DỤNG MÔ HÌNH TRƯỜNG TRỌNG LỰC TRÁI ĐẤT TOÀN CẦU TRONG NỘI SUY TRƯỜNG TRỌNG LỰC CỤC BỘ BẰNG PHƯƠNG PHÁP COLLOCATION

NGUYỄN VĂN SÁNG

Trường Đại học Mở - Địa chất

Tóm tắt:

Mục đích của nghiên cứu này là đánh giá hiệu quả của việc sử dụng mô hình trường trọng lực trái đất toàn cầu (EGM) trong bài toán nội suy trường trọng lực cục bộ ở Việt Nam bằng phương pháp Collocation. Nội suy dị thường trọng lực bằng phương pháp Collocation và phương pháp sử dụng mô hình EGM theo kỹ thuật “Loại bỏ - Tính toán - Phục hồi” đã được nghiên cứu. Kết quả nội suy được đánh giá bằng cách so sánh với giá trị đã biết. Kết quả thực nghiệm tại Miền Trung - Việt Nam cho thấy: Khi sử dụng mô hình EGM theo kỹ thuật “Loại bỏ - Tính toán - Phục hồi”, độ chính xác nội suy dị thường trọng lực trên khu vực nghiên cứu đã tăng lên 2,5 lần; Các độ lệch dị thường trọng lực đã giảm đi đáng kể so với khi không sử dụng mô hình EGM. Điều này chứng tỏ hiệu quả của việc sử dụng mô hình EGM trong bài toán nội suy trường trọng lực cục bộ.

Từ khóa: Mô hình trường trọng lực trái đất toàn cầu; Phương pháp Collocation; Nội suy trường trọng lực.

1. Giới thiệu

Bài toán nội suy trường trọng lực là ước tính các đại lượng chưa biết liên quan đến trường trọng lực, ví dụ: độ lệch dây dọi, dị thường độ cao (hoặc độ cao Geoid) và dị thường trọng lực từ các đại lượng đã biết. Các phương pháp tiếp cận truyền thống như phương pháp tích phân của Stoke và Vening-Meinesz, về cơ bản chỉ sử dụng một loại dữ liệu để xác định một loại dữ liệu khác. Tuy nhiên, trong nhiều trường hợp sẽ có sẵn nhiều loại dữ liệu trường trọng lực khác nhau, tất cả đều chứa thông tin quan trọng cần đưa vào tính toán đồng thời. Lúc đó, phương pháp Collocation sẽ phát huy hiệu quả [6].

Năm 2003, Trung tâm quốc tế về mô hình

trái đất toàn cầu (ICGEM) đã được thành lập để thu thập các mô hình trường trọng lực trái đất toàn cầu (EGM) và cung cấp cho người sử dụng. Ngày nay, ICGEM đã trở thành một trung tâm duy nhất có bộ sưu tập lớn nhất và đầy đủ nhất các mô hình trường trọng lực tĩnh và động. Đến nay, Trung tâm này đã lưu trữ và cung cấp 178 mô hình EGM với các cấp độ, chủng loại và độ chính xác khác nhau dưới dạng hệ số điều hòa cầu [5].

Nhiều nước trên thế giới đã sử dụng các mô hình EGM trong bài toán nội suy trường trọng lực của mình, điển hình như: Năm 2008, Châu Âu đã sử dụng mô hình EIGEN-GL04C trong xây dựng mô hình geoid trọng lực EGG07 [3]. Tại Mỹ, năm 2009, đã sử dụng mô

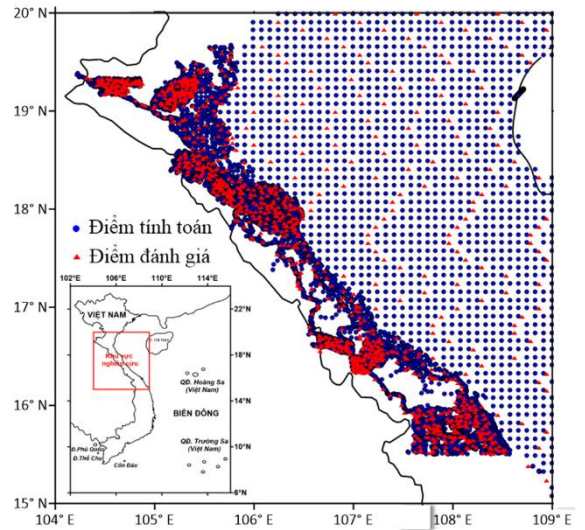
hình EGM2008 trong việc xây dựng mô hình Geoid quốc gia USGG2009 [14]; Năm 2013, Ba Lan đã sử dụng mô hình EGM2008 để xây dựng mô hình Quasigeoid quốc gia GDQM13 [13]; Năm 2018, Iran đã sử dụng mô hình EIGEN6C4 trong việc xây dựng mô hình Geoid quốc gia IRG2018 [12] vv...

Vấn đề đặt ra là: Sử dụng mô hình trường trọng lực trái đất toàn cầu trong bài toán toán nội suy trường trọng lực theo phương pháp Collocation như thế nào? Và hiệu quả của việc sử dụng mô hình EGM ở Việt Nam ra sao? Bài báo này tập trung nghiên cứu hai vấn đề trên.

2. Khu vực nghiên cứu và số liệu nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu được giới hạn bởi vĩ độ từ $15^{\circ} \div 20^{\circ}$ Bắc, kinh độ từ $104^{\circ} \div 109^{\circ}$ Đông. Khu vực nghiên cứu này bao gồm phần đất liền dạng tuyến thuộc Miền Trung Việt Nam, phía Đông là Biển Đông, phía Tây là lãnh thổ của Lào (Hình 1). Địa hình của khu vực nghiên cứu đa dạng: có biển ở phía Đông, giáp Biển Đông là giải đồng bằng hẹp; phía Tây có địa hình đồi núi cao thuộc dãy Trường Sơn, độ cao trung bình từ 1.000 - 1.500 m. Trên phần lãnh thổ của Lào không có các số liệu đo trực tiếp. Khu vực nghiên cứu này được lựa chọn vì nó đặc trưng cho đặc điểm của Việt Nam: có biển, có đồng bằng, có núi và vùng ngoài biên giới không có số liệu đo trực tiếp [9].



Hình 1: Khu vực nghiên cứu và số liệu nghiên cứu

2.2. Số liệu nghiên cứu

a) Mô hình trường trọng lực trái đất toàn cầu EIGEN6C4

EIGEN-6C4 là mô hình trường trọng lực trái đất toàn cầu được xây dựng và công bố năm 2014 bằng cách kết hợp mô hình EGM2008 với nhiều loại dữ liệu vệ tinh khác nhau như: dữ liệu vệ tinh LAGEOS, dữ liệu trọng lực vệ tinh GRACE, dữ liệu gradient trọng lực vệ tinh GOCE. Mô hình EIGEN-6C4 được xây dựng đến cấp và bậc hệ số điều hòa cầu là 2190. Mô hình này đạt độ chính xác 4,8 cm khi so sánh với dữ liệu trên 675 điểm GPS-Thủy chuẩn ở Đức [7]. Khi so sánh với 24014 điểm GNSS-Thủy chuẩn trên toàn cầu, EIGEN6C4 đạt độ chính xác là 17,8 cm [5], [2].

b) Số liệu dị thường trọng lực

Trong nghiên cứu này, số liệu dị thường trọng lực tại 9897 điểm trên phần đất liền đã được sử dụng [9]. Số liệu này nằm trong hệ tọa độ WGS-84 và hệ không phụ thuộc triều. Trên phần biển, 1034 điểm số liệu dị thường trọng lực có nguồn gốc từ số liệu đo cao vệ tinh đã được sử dụng. Số liệu này được lấy từ

mô hình DTU17GRAV do Đan Mạch xây dựng [1].

Để phục vụ nghiên cứu, số liệu này được chia thành 2 phần: Phần 1 dùng để tính toán (các điểm hình tròn, màu xanh trên Hình 1), gồm 9871 điểm; phần 2 gồm 1060 điểm, dùng để đánh giá độ chính xác (các điểm hình tam giác, màu đỏ trên Hình 1).

$$\Delta g_P = C^T(\Delta g, \Delta g_P) \cdot [C(\Delta g, \Delta g) + C_{\Delta g}]^{-1} \cdot \Delta g, \quad (1)$$

trong đó: $C^T(\Delta g, \Delta g_P)$ là ma trận hiệp phương sai dị thường trọng lực giữa điểm P và các điểm đã biết dị thường trọng lực; $C(\Delta g, \Delta g)$ là ma trận hiệp phương sai dị thường trọng lực giữa các điểm đã biết dị thường trọng lực với nhau; $C_{\Delta g}$ là ma trận tương quan độ chính xác dị thường trọng lực; Δg là ma trận các giá trị dị thường trọng lực đã biết.

Các ma trận hiệp phương sai được xác định bằng cách làm khớp hàm hiệp phương sai lý thuyết với các giá trị hiệp phương sai thực nghiệm, chi tiết đã được trình bày trong [10].

3.2. Sử dụng mô hình trường trọng lực trái đất toàn cầu theo kỹ thuật “Loại bỏ - Tính toán - Phục hồi”

Trong bài toán nội suy trường trọng lực theo phương pháp Collocation, giá trị của điểm P không chỉ phụ thuộc vào giá trị các điểm xung quanh gần điểm P (gọi là vùng gần) mà còn phụ thuộc vào các điểm ở xa điểm P (gọi là vùng xa). Thông thường, đối với các

$$\Delta g_{EIGEN} = \frac{GM}{r^2} \left[\sum_{n=2}^{N_{max}} \left(\frac{a}{r}\right)^n (n-1) \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda)) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \right] \quad (2)$$

trong đó GM : Hằng số hấp dẫn của Trái đất; r : khoảng cách từ điểm xét tới tâm Trái Đất; γ : trọng lực chuẩn trên bề mặt elipsoid; a : bán trục

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Nội suy dị thường trọng lực theo phương pháp Collocation

Giả sử trên khu vực nghiên cứu có n điểm đã biết dị thường trọng lực $\Delta g_1, \Delta g_2, \dots, \Delta g_n$. Khi đó, theo phương pháp Collocation, dị thường trọng lực của điểm P được tính bằng công thức [8]:

quốc gia, khi giải quyết các bài toán trường trọng lực, chúng ta chỉ có số liệu trên lãnh thổ quốc gia mình mà khó có số liệu ở ngoài biên giới quốc gia. Trong bối cảnh đó, các mô hình trường trọng lực toàn cầu có sử dụng số liệu tổng hợp trên toàn cầu, số liệu vệ tinh vv... (xem mục 2.2a) sẽ có tác dụng bù đắp số liệu ngoài biên giới cho mỗi quốc gia. Ngoài ra, các số liệu vệ tinh GOCE có độ chính xác cao ở bước sóng 80 - 100 km cũng rất có ích.

Để sử dụng các mô hình trường trọng lực trái đất toàn cầu trong bài toán trường trọng lực cục bộ, kỹ thuật “Loại bỏ - Tính toán - Phục hồi” thường được sử dụng. Theo đó, thành phần bước sóng dài của trường trọng lực được loại bỏ khỏi các giá trị trường trọng lực trước khi đưa vào tính toán và chúng lại được phục hồi tương ứng vào kết quả tính toán.

Trong bài toán nội suy dị thường trọng lực (mục 3.1), dị thường trọng lực tính từ mô hình EIGEN6C4 được tính theo công thức [2]:

lớn của elipsoid tham chiếu; n, m : cấp và bậc tương ứng của hàm điều hòa cầu; N_{max} : bậc cực đại của hàm điều hòa cầu ($N_{max} = 2190$ đối với

mô hình EIGEN6C4); φ : vĩ độ địa tâm; λ : kinh độ địa tâm; $\bar{C}_{n,m}, \bar{S}_{n,m}$: hệ số hàm điều hòa cầu chuẩn hóa; $\bar{P}_{nm}(\sin \varphi')$: hàm Legendre đã được chuẩn hóa. Các hệ số hàm điều hòa cầu $\bar{C}_{n,m}, \bar{S}_{n,m}$ của mô hình trường trọng lực trái đất toàn cầu (EIGEN6C4) có tại Trung tâm quốc tế về mô hình trái đất toàn cầu [5].

Dị thường trọng lực được loại bỏ phần dị thường trọng lực tính từ mô hình EIGEN6C4, còn lại phần dư dị thường trọng lực:

$$\delta g = \Delta g - \Delta g_{EIGEN} \quad (3)$$

Phần dị thường trọng lực của điểm P lúc này được tính theo phương pháp Collocation như sau:

$$\delta g_P = C^T(\delta g, \delta g_P) \cdot [C(\delta g, \delta g) + C_{\delta g}]^{-1} \cdot \delta g \quad (4)$$

Dị thường trọng lực của điểm P được khôi phục thành phần từ mô hình EIGEN6C4:

$$\Delta g_P = \delta g_P + \Delta g_{EIGEN} \quad (5)$$

3.3. Đánh giá độ chính xác nội suy dị thường trọng lực

Để đánh giá độ chính xác, dị thường trọng lực nội suy (Δg_i^{NS}) được so sánh với dị thường trọng lực đã biết trước (điểm đo), Δg_i^{do} . Độ lệch dị thường trọng lực được tính [2]:

$$\delta g_i = \Delta g_i^{NS} - \Delta g_i^{do}, i = 1, 2, \dots, n; n \text{ là số điểm đánh giá} \quad (6)$$

Độ lệch trung bình được tính:

$$\delta g_{TB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta g_i \quad (7)$$

Nếu không có độ lệch hệ thống thì độ lệch trung phương của dị thường trọng lực được tính:

$$RMS_{\Delta g} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta g_i)^2}{n}} \quad (8)$$

Nếu có độ lệch hệ thống thì độ lệch chuẩn được tính [11]:

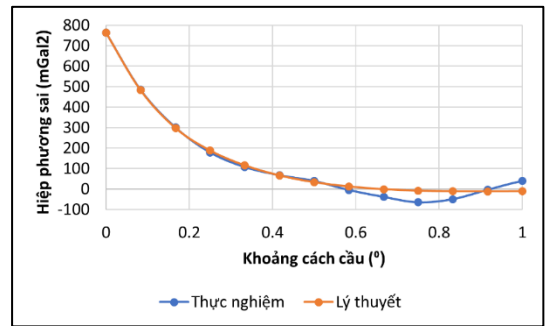
$$STD_{\Delta g} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta g_i - \delta g_{TB})^2}{n - 1}} \quad (9)$$

Dựa vào các giá trị của độ lệch cực đại (δg_{max}), độ lệch cực tiểu (δg_{min}), độ lệch trung bình, độ lệch chuẩn và độ lệch trung phương để đánh giá độ chính xác của dị thường trọng lực nội suy được. Ngoài ra, biểu đồ độ lệch và biểu đồ độ lệch chuẩn cũng là căn cứ để đánh giá độ chính xác.

4. Kết quả tính toán và thảo luận

4.1. Kết quả nội suy dị thường trọng lực khi không sử dụng mô hình trường trọng lực trái đất toàn cầu

Trên cơ sở lý thuyết được trình bày ở trên, từ 9871 giá trị dị thường trọng lực đã được sử dụng để nội suy ra dị thường trọng lực của 1060 điểm đánh giá theo công thức (1), không sử dụng mô hình EIGEN6C4 và kỹ thuật “Loại bỏ - Tính toán - Phục hồi”. Đồ thị làm khớp hàm hiệp phương sai lý thuyết với các giá trị hiệp phương sai thực nghiệm được trình bày trên Hình 2.



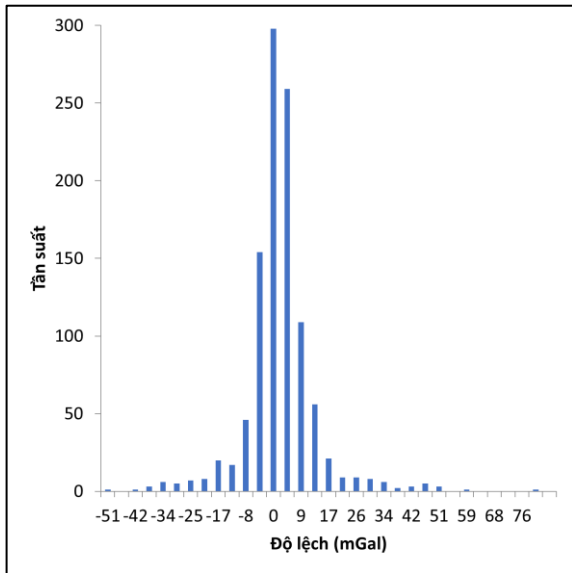
Hình 2: Đồ thị làm khớp hàm hiệp phương sai lý thuyết với các giá trị hiệp phương sai thực nghiệm khi không sử dụng mô hình EIGEN6C4

Kết quả đánh giá độ chính xác của dị thường trọng lực nội suy tại 1060 điểm đánh giá được trình bày trên Bảng 1 (dòng 2).

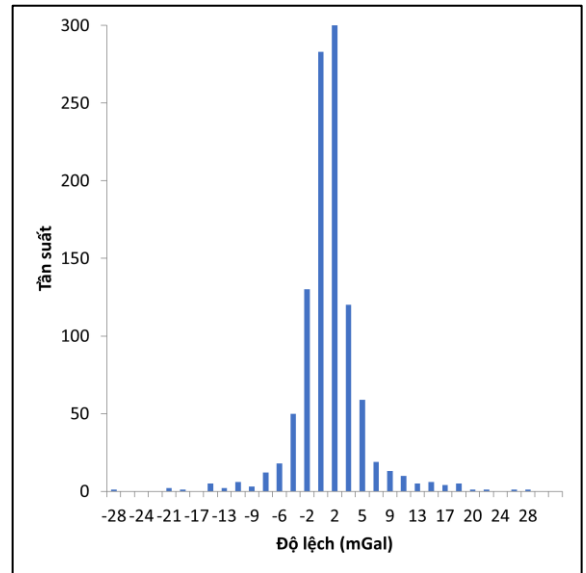
Bảng 1: Thống kê kết quả đánh giá độ chính xác của dị thường trọng lực

Phương án tính toán	δg_{max} (mGal)	δg_{min} (mGal)	δg_{TB} (mGal)	$RMS_{\Delta g}$ (mGal)	$STD_{\Delta g}$ (mGal)
Không sử dụng mô hình EIGEN6C4	84,776	-50,556	0,334	$\pm 11,417$	$\pm 11,412$
Có sử dụng mô hình EIGEN6C4	31,336	-27,926	0,125	$\pm 4,559$	$\pm 4,557$

Biểu đồ tần suất độ lệch được trình bày trên hình 3a. Từ hình này chúng ta thấy: độ lệch tuân theo quy luật ngẫu nhiên.



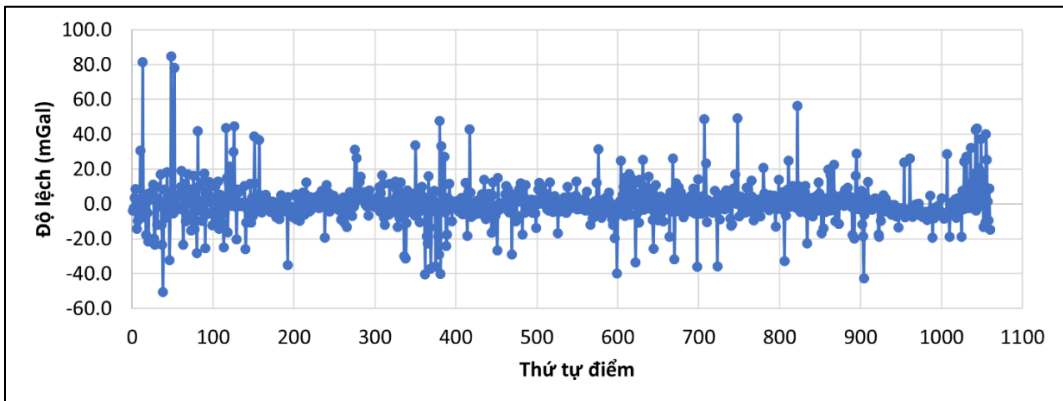
a) Không sử dụng mô hình EIGEN6C4



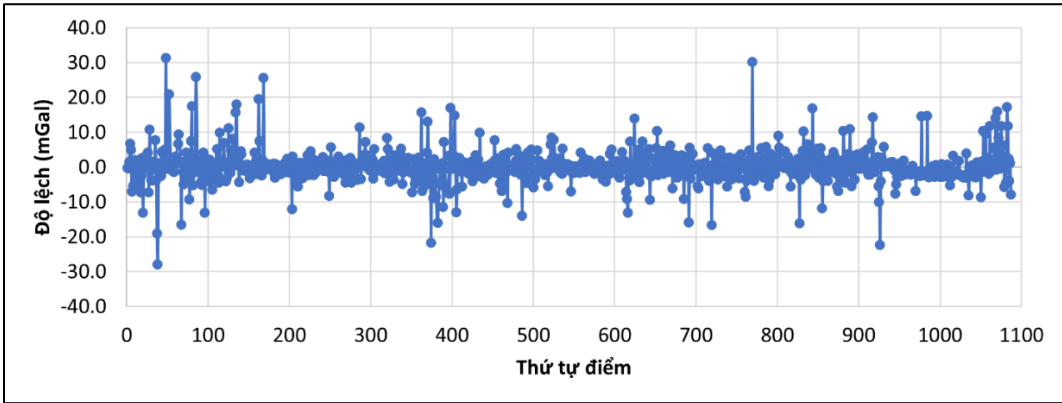
b) Có sử dụng mô hình EIGEN6C4

Hình 3: Biểu đồ tần suất độ lệch

Biểu đồ độ lệch được biểu diễn trên Hình 4. Từ hình này ta thấy: độ lệch phân bố ngẫu nhiên về 2 phía âm, dương; nhiều điểm có độ lệch nhỏ, ít điểm có độ lệch lớn.



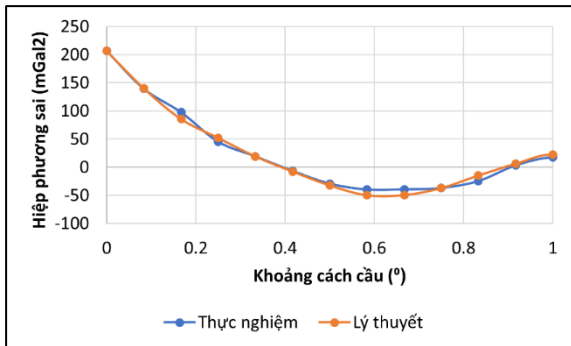
Hình 4: Biểu đồ độ lệch khi không sử dụng mô hình EIGEN6C4



Hình 5: Biểu đồ độ lệch khi có sử dụng mô hình EIGEN6C4

4.2. Kết quả nội suy dị thường trọng lực khi sử dụng mô hình trường trọng lực trái đất toàn cầu

Trong phần này, kết quả nội suy dị thường trọng lực cho 1060 điểm đánh giá từ 9871 giá trị đã biết, theo các công thức (2), (3), (4) và (5), có sử dụng mô hình EIGEN6C4 và kỹ thuật “Loại bỏ - Tính toán - Phục hồi” được trình bày. Đồ thị làm khớp hàm hiệp phương sai lý thuyết với các giá trị hiệp phương sai thực nghiệm được trình bày trên Hình 6.



Hình 6: Đồ thị làm khớp hàm hiệp phương sai lý thuyết với các giá trị hiệp phương sai thực nghiệm khi có sử dụng mô hình EIGEN6C4 và kỹ thuật “Loại bỏ - Tính toán - Phục hồi”

Biểu đồ độ lệch được trình bày trên Hình 5. Từ hình này ta thấy: độ lệch phân bố ngẫu nhiên về 2 phía âm, dương; nhiều điểm có độ lệch nhỏ, ít điểm có độ lệch lớn. So sánh Hình

4 và Hình 5 thì khi có sử dụng mô hình EIGEN6C4, độ lệch giảm đi rất nhiều.

Biểu đồ tần suất độ lệch được trình bày trên Hình 3b. Hình này cho thấy: độ lệch tuân theo quy luật ngẫu nhiên.

Thống kê kết quả đánh giá độ chính xác dị thường trọng lực nội suy được trình bày trong Bảng 1 (dòng 3). So sánh với dòng 2, cột tương ứng, khi có sử dụng mô hình EIGEN6C4, độ chính xác tăng lên rõ rệt: Giá trị tuyệt đối của độ lệch cực đại và cực tiểu đều giảm; độ lệch trung bình giảm từ 0,334 mGal xuống 0,125 mGal; đặc biệt, độ lệch trung phương giảm từ 11,417 mGal xuống còn 4,559 mGal (giảm 2,5 lần). Như vậy, khi sử dụng mô hình trường trọng lực trái đất toàn cầu và kỹ thuật “Loại bỏ - Tính toán - Phục hồi”, độ chính xác nội suy dị thường trọng lực đã tăng lên 2,5 lần.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp nội suy dị thường trọng lực theo Collocation khi có sử dụng mô hình trường trọng lực trái đất toàn cầu và kỹ thuật “Loại bỏ - Tính toán - Phục hồi”. Theo phương pháp này, trường trọng lực bước sóng dài từ mô hình EGM được loại bỏ trước khi tính toán và lại được phục hồi tương ứng sau khi tính toán.

Sử dụng mô hình trường trọng lực trái đất toàn cầu và kỹ thuật “Loại bỏ - Tính toán - Phục hồi”, độ chính xác nội suy dị thường trọng lực trên khu vực nghiên cứu đã nâng lên 2,5 lần; Các độ lệch dị thường trọng lực đã giảm đi đáng kể so với khi không sử dụng mô hình EGM và vẫn tuân theo quy luật ngẫu nhiên. Điều này cho thấy hiệu quả của việc sử dụng mô hình EGM trong bài toán nội suy trường trọng lực cục bộ là rất cao.○

Lời cảm ơn:

Tác giả xin chân thành cảm ơn Đề tài cấp quốc gia Việt Nam ĐTDLCN.07/23 đã tài trợ cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

[1]. Andersen O. và Knudsen P. (2019), "The DTU17 global marine gravity field: First validation results", *Fiducial Reference Measurements for Altimetry*, Springer, pp. 83-87.

[2]. Bernhard Hofmann-Wellenhof, Helmut Moritz (2005). *Physical Geodesy*. ISBN-10 3-211-23548-1 Springer Wien New York, ISBN-13 978-3-211-23584-3 Springer Wien New York.

[3]. Denker H., Barriot J. P., Barzaghi R., Fairhead D., Forsberg R., Ihde J., Kenyere A., Marti U., Sarrailh M. và Tziavos I. (2009), "The development of the European gravimetric geoid model EGG07", *Observing Our Changing Earth*, Springer, pp. 177-185.

[4]. Do Van Mong, Nguyen Van Sang, Tran Tuan Dung, Nguyen Thanh Le, Khuong Van Long, Nguyen Dinh Hai, Tran Manh Cuong, Nguyen Trong Dai, Tran Tuan Duong (2023). Evaluation of the precision of some new global Earth Gravitational Models in the East Vietnam Sea. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology* 2023, 23(3) 265-277. ISSN 1859-3097; e-ISSN 2815-5904/© 2023

Vietnam Academy of Science and Technology (VAST). <https://doi.org/10.15625/1859-3097/18635>.

[5]. E. Sinem Ince, Franz Barthelmes, Sven Reißland, Kirsten Elger, Christoph Förste, Frank Flechtner and Harald Schuh (2019). ICGEM - 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans. *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 647-674, 2019. <https://doi.org/10.5194/essd-11-647-2019>.

[6]. Forsberg R. and C. C. Tsherning (1981). The use of height data in gravity field approximation by collocation. *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, No. B9, pages 7843-7854, September 10, 1981.

[7]. Förste Ch., Bruinsma S., Abrykosov O., Lemoine J-M. et al. (2014). The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse (EIGEN 6C4). 5th GOCE user workshop, Paris 25-28, Nov.

[8]. Neiman. Y. M. (2010). Phương pháp hiệp phương sai trong trắc địa vật lý và Collocation, Matxcova (tiếng nga).

[9]. Nguyễn Thành Lê (2023). Nghiên cứu xác định dị thường độ cao trên cơ sở kết hợp các dữ liệu mặt đất và vệ tinh, áp dụng cho khu vực miền Trung Việt Nam. Luận án tiến sĩ kỹ thuật. Trường Đại học Mở - Địa chất.

[10]. Nguyễn Văn Sáng (2013). Xác định các hàm hiệp phương sai khi tính dị thường trọng lực bằng số liệu đo cao vệ tinh sử dụng phương pháp Collocation. Tạp chí khoa học kỹ thuật Mở - Địa Chất (số 41, tr 48 - 51), trường Đại học Mở - Địa Chất, Hà Nội. ISSN: 1859 - 1469.

[11]. Nguyễn Văn Sáng, Vũ Văn Hạnh (2016). Đánh giá độ chính xác của số liệu trọng lực biển đo bằng máy YZLS Dynamic Gravimeter. Tạp chí khoa học kỹ thuật Mỏ - Địa Chất (số 57, tr 105 - 109), trường Đại học Mỏ - Địa Chất, Hà Nội. ISSN: 1859 - 1469.

[12]. Sabah R., Yosra A., Mirko R., Abdolreza S. và Abdoreza S. (2019), "IRG2018: A regional geoid model in Iran using Least Squares Collocation", *Stud. Geophys. Geod.*

[13]. Szelachowska M. và Kryński J. (2014), "GDQM-PL13-the new gravimetric quasigeoid model for Poland", *Geoinformation Issues*. 6(1), pp. 5-19.

[14]. Wang Y. M., Saleh J., Li X. và Roman D. R. (2012), "The US Gravimetric Geoid of 2009 (USGG2009): model development and evaluation", *Journal of Geodesy*. 86(3), pp. 165-180.○

Summary

The effectiveness of using the global Earth Gravity Model in interpolating the local gravity field using the Collocation method

Nguyen Van Sang

Hanoi University of Mining and Geology

This study aims to assess the effectiveness of using the global Earth Gravity Model (EGM) in the local gravity field interpolation in Vietnam using the Collocation method. Gravity anomaly interpolation by the Collocation method and using the EGM according to the "Remove - Compute - Restore" technique have been studied. The interpolation results are evaluated by comparing them with known values. The experimental results in the Central region of Vietnam show that the precision of interpolation of gravity anomalies in the study area has increased 2.5 times when using the EGM according to the "Remove - Calculate - Restore" technique, and Gravity anomaly deviations have decreased significantly compared to when the EGM model is not used. This result has demonstrated the effectiveness of using the EGM in the local gravity field interpolation.○

Keywords: Global Earth Gravity Model; Collocation method; Gravity field interpolation.