

Mô hình mạng đồng hồ nguyên tử quang để thống nhất hệ độ cao Châu Á

Hoàng Anh Thế ¹, Nguyễn Dũng Dương^{2,*}

¹Viện Nông nghiệp và Tài nguyên, trường Đại học Vinh

²Trường đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội

*Email tác giả liên hệ: ndduong.ph@hunre.edu.vn

<https://doi.org/10.67484/mgc.115>

Tóm tắt: Một trong những nhiệm vụ cơ bản của ngành trắc địa là làm sao để thống nhất hệ độ cao của các quốc gia trên toàn thế giới hoặc trong khu vực. Việc này sẽ giúp cho quá trình nghiên cứu các dự án liên quốc gia, liên châu lục như sự dâng lên của mực nước biển, hoặc các công trình xây dựng liên quốc gia sẽ đảm bảo được độ chính xác. Tuy nhiên, các phương pháp truyền thống như thủy chuẩn hình học sẽ không thực hiện được vì quá tốn kém về thời gian và kinh phí. Một trong những hướng nghiên cứu mới gần đây là ứng dụng trắc địa tương đối tính để thống nhất hệ độ cao toàn cầu. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả xây dựng một mô hình thống nhất hệ độ cao Châu Á bằng mạng lưới đồng hồ nguyên tử quang học độ chính xác cao. Kết quả mô phỏng cho thấy có thể thống nhất hệ thống độ cao Châu Á với độ chính xác ở mức $2 \div 3\text{cm}$. Đây là một kết quả khả quan cho các nghiên cứu thực tế tiếp theo.

Từ khóa: Trắc địa tương đối tính; Hệ độ cao toàn cầu; Đồng hồ nguyên tử; Cáp quang.

Ngày nhận bài: 26/06/2026 Ngày sửa lại: 28/07/2026 Ngày chấp nhận đăng: 28/07/2026 Ngày xuất bản: 30/08/2026

Optical atomic clock network model for unifying the Asian height system

Hoang Anh The ¹, Nguyen Dung Duong^{2,*}

¹School of Agriculture and Natural Resources, Vinh University

²Hanoi University of Natural Resources and Environment

*Corresponding Author Email: ndduong.ph@hunre.edu.vn

Abstract: One of the fundamental tasks of geodesy is to unifying the height systems of countries worldwide or within a specific region. This will help ensure accuracy in research for transnational and intercontinental projects, such as sea level rise or transnational construction projects. However, traditional methods such as spirit leveling are not feasible due to their high time and cost. One of the recent research directions is the application of relativistic geodesy to unifying the global height system. In this study, the authors developed a simulation to standardize the Asian height system using a network of high-precision optical clocks. The simulation results show that it is possible to unifying the Asian height system with an accuracy of $2 \div 3\text{cm}$. This is a promising result for further practical research.

Keywords: Relative geodesy; Global height system; Optical clock; Fiber optics.

Submission received: 26/06/2026

Revised: 28/06/2026

Accepted: 28/07/2026

Published: 30/08/2026

1. Giới thiệu

Trong các công việc quan trọng, có tác động xã hội lớn như giám sát mực nước biển dâng, giám sát biến dạng vỏ Trái đất, giám sát sụt lún lòng đất, v.v., thì yêu cầu về độ chính xác trong việc xác định độ cao là rất nghiêm ngặt. Hiện nay, việc thực hiện các hoạt động này ở mỗi quốc gia về cơ bản được đảm bảo tốt, việc xác định độ cao được thực hiện bằng phương pháp đo cao bằng thủy chuẩn hoặc phương pháp GNSS kết hợp với dữ liệu trọng lực. Tuy nhiên, khi áp dụng rộng rãi hơn cho một khu vực hoặc toàn cầu, việc tham chiếu đến cùng một mặt phẳng tham chiếu là rất khó. Điều này là do mỗi quốc gia (hoặc khu vực) sử dụng mặt phẳng tham chiếu riêng và có hệ thống độ cao riêng, chủ yếu sử dụng mực nước biển trung bình làm mặt phẳng tham chiếu. Điều này dẫn đến sự khác biệt giữa các hệ thống này lên đến 1-2 m [1]. Hiện nay trên thế giới có hơn 100 hệ thống độ cao và việc thống nhất các hệ thống độ cao này là một vấn đề có ý nghĩa thực tiễn cao. Để thống nhất hệ thống độ cao toàn cầu, Hiệp hội Đo đạc Quốc tế (IAG) đã ban hành nghị quyết số 1 về định nghĩa và thực hiện Hệ thống Tham chiếu Độ cao Quốc tế (IHRs) năm 2015 và nghị quyết số 3 về việc thiết lập Khung Tham chiếu Độ cao Quốc tế (IHRF) năm 2019. Kể từ đó, các nhà khoa học đã nỗ lực rất nhiều để đưa ra nhiều phương pháp khác nhau nhằm thiết lập một hệ thống độ cao khu vực và toàn cầu thống nhất [2-5].

Liên quan đến việc thống nhất hệ thống độ cao thế giới, một số phương pháp khác nhau đã được đề xuất [5-8]: (1) Đo cao kết hợp dữ liệu trọng lực [5]. Phương pháp này cho kết quả tốt, độ chính xác có thể đạt mức milimét nếu khoảng cách giữa hai điểm đo không quá xa nhau. Tuy nhiên, phương pháp này có sai số tích lũy lớn nếu khoảng cách giữa hai điểm lớn. Ngoài ra,

phương pháp này rất tốn công sức, mất thời gian và rất tốn kém về mặt kinh tế. Hơn nữa, bằng cách sử dụng phương pháp này, độ cao không thể được truyền tải hiệu quả qua đại dương, vì vậy rất khó để sử dụng nó để thống nhất độ cao toàn cầu. (2) Đo cao đại dương [6]. Độ chính xác của phương pháp này có thể đạt mức decimet, thích hợp để kết nối độ cao của các quốc gia có chung đường bờ biển. Tuy nhiên, hạn chế của phương pháp này là nó yêu cầu mật độ dữ liệu giám sát thủy triều ven biển đủ lớn trong nhiều năm. Và phương pháp này không hiệu quả đối với các quốc gia nằm sâu trong đất liền mà không có đường bờ biển. (3) Ước tính tiềm năng dị thường bằng cách giải quyết bài toán giá trị biên trắc địa [9]. Phương pháp này cho độ chính xác ở mức centimet đối với các khu vực khảo sát tốt và độ chính xác ở mức decimet đối với các khu vực có ít dữ liệu hơn. Tuy nhiên, phương pháp này yêu cầu một lượng lớn dữ liệu, chẳng hạn như dữ liệu trọng lực, dữ liệu thủy triều, dữ liệu mô hình tiềm năng địa cầu, v.v., và kết quả sẽ bị ảnh hưởng bởi nhiều lỗi từ các dữ liệu này. (4) Sử dụng mô hình trọng lực toàn cầu [10]. Hiện nay, có nhiều mô hình trọng lực được các nhà khoa học đưa ra, chẳng hạn như EGM2008, EIGEN6C4,... Các mô hình khác nhau có thể cho kết quả khác nhau do sử dụng các tập dữ liệu khác nhau. Vấn đề cốt lõi nằm ở chỗ độ phân giải của các mô hình không đủ tốt.

Gần đây, các nhà khoa học đã áp dụng phương pháp trắc địa tương đối tính để giải quyết vấn đề này. Một số nghiên cứu đã đề xuất mạng lưới đồng hồ để thiết lập hệ thống độ cao toàn cầu. Wu và Müller (2020) đã đề xuất một mạng lưới đồng hồ được kết nối bằng liên kết vệ tinh và cả liên kết cáp quang, với một hệ thống phân cấp cụ thể, bao gồm đồng hồ chuẩn, đồng hồ lõi và đồng hồ khu vực/quốc gia [8]. Các tính toán mô phỏng trong khu vực châu Âu cho thấy độ chính xác là 1cm với giả định đồng hồ có độ ổn định 10^{-18} . Shen và đồng nghiệp đã đề xuất một mô hình đồng hồ được kết nối bằng vệ tinh, sử dụng phương pháp truyền tín hiệu tần số vệ tinh, và các tính toán mô phỏng của họ cho thấy độ chính xác chênh lệch độ cao OH là 2 cm có thể đạt được bằng cách sử dụng đồng hồ có độ chính xác 10^{-18} [7]. Tất cả các nghiên cứu đều cho thấy tiềm năng của trắc địa tương đối tính trong việc thiết lập hệ thống độ cao toàn cầu. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sẽ trình bày một mô hình mạng lưới đồng hồ quang học được kết nối bằng cáp quang để thống nhất hệ thống độ cao khu vực Châu Á.

2. Phương pháp nghiên cứu

Trắc địa tương đối tính dựa trên thuyết tương đối rộng của Einstein: chiếc đồng hồ ở vị trí thấp hơn - nằm trong thế trọng trường mạnh hơn - sẽ chạy chậm hơn chiếc đồng hồ ở vị trí cao hơn. Vì vậy, khi so sánh tần số của đồng hồ tại hai điểm, ta có thể xác định chênh lệch thế trọng trường (cũng như độ cao chính) giữa hai điểm đó. Mỗi liên hệ này được biểu thị bằng công thức sau [11]:

$$\Delta W_{AB} = \frac{\Delta f_{AB}}{f} c^2 \quad (1)$$

trong đó, c là tốc độ ánh sáng, f là tần số chuẩn, Δf_{AB} và W_{AB} tương ứng là sự dịch chuyển tần số và chênh lệch thế trọng trường giữa 2 điểm A và B.

Giả sử chiều cao của điểm A đã biết và cần xác định chiều cao của điểm B. Độ cao chính H_B của điểm B sẽ được xác định bằng công thức sau [12]:

$$H_B = \frac{H_A(g_A + 0.0424H_A)}{g_B + 0.0424H_B} + \frac{c^2}{g_B + 0.0424H_B} \frac{\Delta f_{AB}}{f} \quad (2)$$

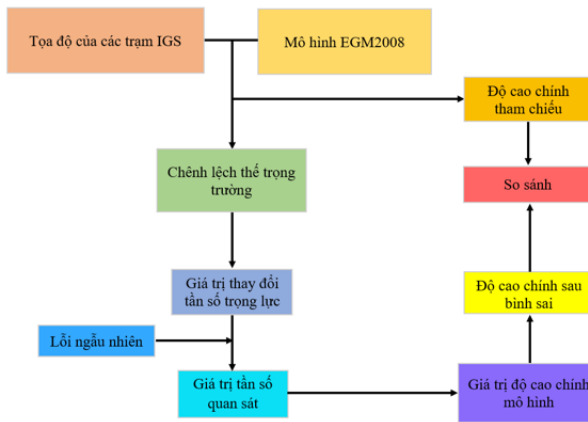
trong đó g_A , g_B tương ứng là giá trị trọng lực đo tại điểm A và B. Từ công thức (2), nếu biết H_A và đo được giá trị dịch chuyển tần số Δf_{AB} , thì có thể xác định được H_B . Công thức này sẽ được giải bằng phương pháp tính lặp. Đây là nguyên lý xác định độ cao dựa trên hướng tiếp cận trắc địa tương đối tính.

3. Kết quả nghiên cứu

3.1 Xây dựng mô hình

Để kiểm chứng ý tưởng sử dụng mạng đồng hồ quang học để thống nhất hệ thống độ cao, chúng tôi đã thiết kế một mô hình mạng đồng hồ quang học sử dụng liên kết cáp quang để thống nhất hệ thống độ cao châu Á. Mô hình này lấy một hệ thống điểm có độ cao trắc địa đã biết làm đầu vào. Giả sử mỗi điểm có một trạm đồng hồ quang học và chúng ta thu được "giá trị đo chênh

lệch độ cao" bằng cách cộng các sai số ngẫu nhiên, tương ứng với sai số của phương pháp so sánh tần số đồng hồ. Sau khi thực hiện hiệu chỉnh theo phương pháp hiệu chỉnh bình phương nhỏ nhất với các trường hợp khác nhau khi chọn điểm tham chiếu, thu được độ cao trắc địa của mô hình



Hình 1. Sơ đồ mô hình

sau khi hiệu chỉnh. So sánh hai giá trị độ cao trước và sau khi hiệu chỉnh để có được kết quả sử dụng mạng đồng hồ để thống nhất hệ thống độ cao. Sơ đồ mô hình được thể hiện trong Hình 1.

Mô hình được thiết lập như sau:

- Tất cả các đồng hồ trong mạng lưới đều là đồng hồ quang học với độ ổn định từ 10^{-18} .

- Vị trí của các đồng hồ chúng tôi sử dụng là vị trí của các trạm IGS (Dịch vụ GNSS Quốc tế). Tọa độ (Kinh độ, Vĩ độ, Độ cao elip) của các trạm được lấy từ trang web: <https://igs.org/network>

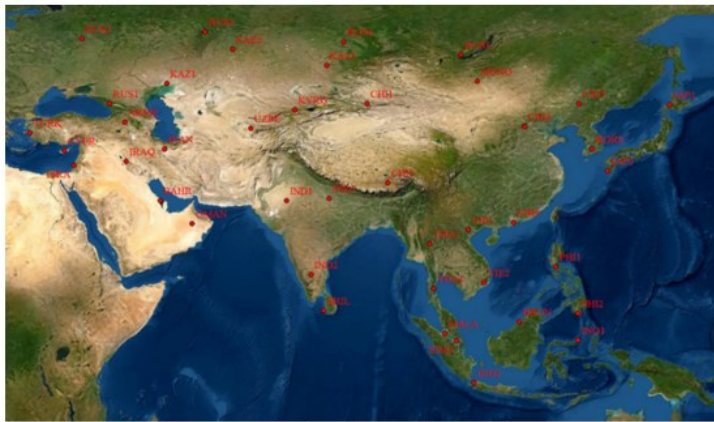
- Một số quốc gia có diện tích lớn, chúng tôi đã thiết kế nhiều đồng hồ hơn (ví dụ: Trung Quốc có 5 đồng hồ, Ấn Độ có 3 đồng hồ). Một số quốc gia không có trạm IGS, chúng tôi không thiết kế đồng hồ. Chủ yếu mỗi quốc gia sẽ có một đồng hồ. Tổng số đồng hồ trong mạng lưới là 42.

- Để tạo điều kiện thuận lợi cho việc kết nối giữa các đồng hồ, chúng tôi chia châu Á thành năm khu vực: Tây Á (bao gồm các quốc gia như: Thổ Nhĩ Kỳ, Israel, Iran, Iraq, Ả Rập Xê Út, Oman, Síp, Armenia, Bahrain, ...); Trung Á (bao gồm các quốc gia như: Turkmenistan, Uzbekistan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Kazakhstan); Đông Á (bao gồm Trung Quốc, Nhật Bản, Hàn Quốc, Triều Tiên và Mông Cổ); Nam Á (bao gồm các quốc gia như Ấn Độ, Afghanistan, Bhutan, Sri Lanka, Pakistan...); Đông Nam Á (bao gồm các quốc gia như: Singapore, Indonesia, Malaysia, Thái Lan, Việt Nam,...) và Bắc Á (bao gồm một phần của Nga). Mỗi khu vực sẽ tạo thành một vòng khép kín.

- Độ cao trắc địa của các trạm sẽ được tính theo công thức: $H = h - N$. Trong đó, h được lấy từ dữ liệu của các trạm IGS tại <https://igs.org/network>, độ cao N được tính từ mô hình EGM2008, lấy từ trang web <http://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints>

- Chúng tôi giả định rằng đồng hồ trong mô hình có độ ổn định từ 10^{-18} , do đó độ chính xác của các giá trị chênh lệch độ cao đo được là 1cm.

- Từ tọa độ các trạm và mô hình EGM2008, chúng ta thu được chênh lệch độ cao mô hình giữa các trạm. Để tạo ra "giá trị đo được", chúng tôi thêm các sai số ngẫu nhiên có độ lớn tối đa là 1cm (tương ứng với độ chính xác giả định của đồng hồ quang học được sử dụng trong mô hình) vào các giá trị chênh lệch thu được từ mô hình. Chúng tôi coi những "giá trị đo được chênh lệch độ cao" này là kết quả của các phép đo so sánh đồng hồ.



Hình 2. Sơ đồ mạng đồng hồ để thống nhất hệ thống đo độ cao ở Châu Á

- Bằng cách điều chỉnh mạng lưới theo phương pháp bình phương tối thiểu [PPV] = Min, ta thu được sự chênh lệch độ cao mô phỏng của các trạm. So sánh giá trị này với sự chênh lệch độ cao thực tế để đánh giá hiệu quả của phương pháp.

Thông tin cụ thể về mô hình được trình bày trong Bảng 1. Thông tin về các trạm đồng hồ được trình bày trong Bảng 2. Giá trị độ

cao của các trạm được trình bày trong Bảng 3. Sơ đồ mô hình mạng đồng hồ quang sử dụng liên kết cáp quang để thống nhất độ cao ở châu Á được thể hiện trong Hình 2.

Bảng 1. Các thông số sử dụng trong mô hình

Thông số	Giá trị
Độ ổn định của đồng hồ	10^{-18}
Tọa độ các trạm	https://igs.org/network
EGM2008	http://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints
Độ chính xác xác định độ cao	1 cm
Tổng số trạm	42
Tổng số chênh cao	49

Bảng 2. Thông tin của các trạm IGS

STT	Trạm	Số DOMES	Vĩ độ	Kinh độ	Vị trí
1	TURK	20817M001	38.2341	27.0455	Izmir, Turkey
2	CYPR	14302M001	35.0828	33.2347	Nicosia, Cyprus
3	ISRA	20705M001	32.4644	35.0112	Haifa, Israel
4	IRAQ	20308M001	33.2029	44.2618	Palestine Street, Iraq
5	ARME	12312M002	40.1709	44.0508	Aruch-Yerevan, Armenia
6	RUS1	12351M001	43.4718	41.3354	Zelenchukskaya, Russian
7	BAHR	24901S002	26.1233	50.3629	Manama, Bahrain
8	OMAN	25001M001	22.1111	56.0644	Yibal, Oman
9	KAZ1	25605M001	47.0751	51.5714	Atyrau, Kazakhstan
10	KAZ2	25609M001	53.1328	63.3629	Kostanay, Kazakhstan
11	KAZ3	25608M001	50.2558	80.1557	Semey, Kazakhstan
12	IRAN	20404M002	35.4150	51.2003	Tehran, Iran
13	RUS2	12365M001	55.0654	36.3410	Obninsk, Russian
14	RUS3	12362M001	56.2547	58.3338	Arti, Russian
15	RUS4	12319M001	54.5026	83.1408	Novosibirsk, Russian
16	RUS5	12313M001	52.1308	104.1858	Irkutsk, Russian
17	MONG	24201M001	47.5154	107.0308	Ulaanbataar, Mongolia
18	UZBE	12334M004	39.0800	66.5312	Kitab, Uzbekistan
19	KYRG	12348M001	42.4047	74.4139	Bishkek, Kyrgyzstan
20	IND1	22313M001	26.1224	73.0126	Jodhpur, India
21	IND2	22306M002	13.0116	77.3413	Bangalore, India
22	IND3	22305M005	26.5444	80.5720	Lucknow, India
23	SRIL	23501M003	6.5331	79.5227	Narahenpita, Sri Lanka
24	CHI1	21612M001	43.4829	87.3602	Urumqi, China
25	CHI2	21613M002	29.3926	91.0614	Lhasa, China
26	CHI3	23015M001	22.2219	113.5541	Tuen Mun, China
27	CHI4	21601M001	39.3631	115.5333	Fangshan, China
28	CHI5	21611M002	43.4726	125.2636	Chang Chun, China

29	KORE	23910M001	35.3524	127.5511	Geochang, Korea
30	JAP1	21731S004	43.3143	141.5041	Shintotsukawa, Japan
31	JAP2	21742S001	31.4927	130.3559	Aira, Japan
32	PHI1	22006M005	14.3208	121.0227	Taguig City, Philippines
33	PHI2	22013M001	6.0354	125.0754	G.Santos, Philippines
34	IND1	23105M002	1.2620	125.1126	Bitung, Indonesia
35	BRUN	22501M001	4.5816	114.5709	Gadong, Brunei
36	VIE1	24301M001	21.0017	105.5038	Hanoi, VietNam
37	VIE2	24306M001	11.5642	108.2855	Da Lat, VietNam
38	THA1	21908M001	18.4539	98.5557	Chiang Mai, Thailand
39	THA2	21907M001	10.4329	99.2228	Chumphon, Thailand
40	MALA	22720M001	2.4705	101.3024	Putrajaya, Malaysia
41	SING	22601M003	1.2035	103.4046	Singapore, Singapore
42	IND2	23101M005	-6.2925	106.5057	Cibinong, Indonesia

Bảng 3. Giá trị độ cao của các trạm

STT	Trạm	Độ cao Trắc địa	Dị thường độ cao	Độ cao chính	Ghi chú
1	TURK	74.900	38.982	35.918	Điểm gốc
2	CYPR	191.700	28.868	162.832	
3	ISRA	225.100	20.787	204.313	
4	IRAQ	72.400	-0.982	73.382	
5	ARME	1222.000	22.909	1199.091	
6	RUS1	1167.000	26.118	1140.882	
7	BAHR	-13.900	-26.735	12.835	
8	OMAN	95.100	-34.661	129.761	
9	KAZ1	-32.052	-14.598	-17.454	
10	KAZ2	163.031	-20.428	183.459	
11	KAZ3	180.211	-43.904	224.115	Điểm gốc
12	IRAN	1194.570	3.007	1191.563	
13	RUS2	182.634	16.048	166.586	
14	RUS3	247.511	-5.997	253.508	
15	RUS4	123.643	-37.028	160.671	
16	RUS5	502.317	-38.059	540.376	
17	MONG	1575.700	-36.710	1612.410	
18	UZBE	620.631	-37.319	657.950	
19	KYRG	1714.200	-35.744	1749.944	
20	IND1	168.200	-46.797	214.997	
21	IND2	843.715	-85.485	929.199	
22	IND3	64.182	-63.636	127.819	
23	SRIL	-78.500	-100.336	21.836	Điểm gốc
24	CHI1	858.900	-59.181	918.081	
25	CHI2	3622.000	-33.820	3655.820	
26	CHI3	95.300	-4.278	99.578	Điểm gốc
27	CHI4	87.413	-10.860	98.273	
28	CHI5	268.300	14.999	253.301	
29	KORE	927.965	27.755	900.210	
30	JAP1	118.540	32.107	86.433	
31	JAP2	314.640	32.422	282.218	
32	PHI1	86.647	44.342	42.305	
33	PHI2	121.124	71.520	49.604	
34	INO1	74.993	69.356	5.637	
35	BRUN	90.669	43.108	47.561	
36	VIE1	34.870	-27.985	62.855	
37	VIE2	1587.620	4.031	1583.589	
38	THA1	308.962	-38.579	347.541	
39	THA2	9.143	-27.922	37.065	
40	MALA	15.002	-3.361	18.363	

41	SING	92.540	6.654	85.886	Điểm góc
42	INO2	169.133	17.241	151.892	

3.2 Kết quả mô hình

Để tính toán độ chính xác của mạng đồng hồ, chúng tôi thực hiện 5 thử nghiệm, mỗi thử nghiệm sử dụng số lượng đồng hồ tham chiếu khác nhau được phân bố đều trên mạng, chi tiết được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Số lượng đồng hồ tham chiếu cho mỗi thử nghiệm

Thử nghiệm 1	Thử nghiệm 2	Thử nghiệm 3	Thử nghiệm 4	Thử nghiệm 5
5 đồng hồ (CHI3, TURK, SRIL, SING)	4 đồng hồ (CHI3, TURK, KAZ3, SRIL)	3 đồng hồ (CHI3, TURK, KAZ3)	2 đồng hồ (CHI3, TURK)	1 đồng hồ (CHI3)

Đầu tiên, để ước tính độ chính xác của mạng đồng hồ, chúng tôi thiết lập độ lớn của các sai số ngẫu nhiên giới hạn là 1cm, tương ứng với độ chính xác của đồng hồ sử dụng trong mô hình. Sai số bình phương tối đa của kết quả chiều cao trong mạng được thể hiện trong Bảng 5.

Bảng 5. Kết quả ước tính với các thử nghiệm

	Thử nghiệm 1	Thử nghiệm 2	Thử nghiệm 3	Thử nghiệm 4	Thử nghiệm 5
Tên trạm	CHI52	SING	SING	KAZ2	ISRA
Sai số	15 mm	17 mm	17 mm	18 mm	22 mm

Tiếp theo, chúng ta cộng thêm vào sự chênh lệch độ cao (ở đây, sự chênh lệch độ cao giữa các trạm được tính từ độ cao trắc địa của các trạm, được thể hiện trong Bảng 3, bằng công thức: $H_{AB} = H_B - H_A$) một sai số ngẫu nhiên có độ lớn tối đa là 1cm, ta thu được "giá trị đo". Coi "giá trị đo" này là kết quả của việc so sánh đồng hồ bằng phương pháp OFFT. Mạng đồng hồ quang học được xử lý bằng phương pháp hiệu chỉnh bình phương nhỏ nhất, các ẩn số được tính theo công thức:

$$X = (A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (3)$$

trong đó, A là ma trận thiết kế hoàn chỉnh, P là ma trận trọng số và L là vector quan sát.

Kết quả cuối cùng, chúng ta có thể xác định sai số bình phương tối đa của chiều cao như thể hiện trong Bảng 6. Sự khác biệt tối đa giữa chiều cao sau khi điều chỉnh và giá trị chiều cao thực được thể hiện trong Bảng 7.

Bảng 6. Sai số tối đa của độ cao sau bình sai với các thử nghiệm

	Thử nghiệm 1	Thử nghiệm 2	Thử nghiệm 3	Thử nghiệm 4	Thử nghiệm 5
Tên trạm	CHI5	SING	SING	SING	ISRA
Sai số	16 mm	19 mm	20 mm	21 mm	26 mm

Bảng 7. Chênh lệch tối đa giữa chiều cao sau khi bình sai và giá trị chiều cao thực tế

	Thử nghiệm 1	Thử nghiệm 2	Thử nghiệm 3	Thử nghiệm 4	Thử nghiệm 5
Tên trạm	THA1	JAP1	JAP1	JAP1	CYPR
Chênh lệch lớn nhất	23 mm	18 mm	18 mm	18 mm	38 mm

4. Kết luận

Thống nhất hệ độ cao toàn cầu ở mức centimet là bài toán mở trong cộng đồng trắc địa. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng phương pháp so sánh tần số đồng hồ để thống nhất hệ thống độ cao toàn cầu. Kết quả nghiên cứu cho thấy, một mạng đồng hồ quang với các đồng hồ độ chính xác cao (1×10^{-18} trở lên) được kết nối bằng các sợi quang có thể thống nhất hệ thống độ cao toàn cầu ở cấp độ centimet, thậm chí milimet. Để xác định độ cao ở mức 1 cm, độ chính xác của đồng hồ phải đạt 1×10^{-18} hoặc cao hơn. Với sự phát triển của công nghệ đồng hồ, đồng hồ có độ chính xác 7×10^{-19} đã được tạo ra trong phòng thí nghiệm và đồng hồ di động đã đạt được mức 10^{-18} . Điều này làm cho phương pháp so sánh tần số đồng hồ có tiềm năng và triển vọng trong việc thống nhất hệ thống độ cao toàn cầu.

Với số lượng đồng hồ tham chiếu khác nhau, độ chính xác của mạng đồng hồ là từ 1,6 – 2,6 cm, chênh lệch tối đa giữa giá trị chiều cao thực và chiều cao tính toán từ mô phỏng là 3,8 cm. Đây là kết quả đầy hứa hẹn cho sự thống nhất của hệ thống chiều cao châu Á.

Cam kết của các tác giả

Tất cả các tác giả có tên trong bài báo cam kết sự đồng thuận và không có xung đột lợi ích trong công bố khoa học tại bài báo này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Sideris, M. 2015. Geodetic world height system unification. In Freedden, W., Zuhair Nashed, M., and Sonar, T., editors, Handbook of Geomathematics, pages 3067–3085. Springer Berlin Heidelberg.
- [2] Ihde, J.; Sanchez, L. 2005. A unified global height reference system as a basis for IGGOS, *J. Geodyn.* 40 (4-5) 400-413. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.06.015>.
- [3] Ihde, J., Sánchez, L., Barzaghi, R., Drewes, H., Foerste, C., Gruber, T., Liebsch, G., Marti, U., Pail, R., Sideris, M. 2017. Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHRs). *Surv Geophys* 38(3):549–570. <https://doi.org/10.1007/s10712-017-9409-3>.
- [4] Sánchez, L., Dayoub, N., Cunderlik, R., Minarechová, Z., Mikula, K., Vatrt, V., Vojtíšková, M., Šíma, Z. 2014. W_0 estimates in the frame of the GGOS working group on vertical Datum Standardisation. In: *International Association of Geodesy Symposia, Springer International Publishing*, vol 141, pp 203–210, https://doi.org/10.1007/978-3-319-10837-7_26
- [5] Sánchez, L., Sideris, M. G. 2017. Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHRs). *Geophys J Int* 209:570-586. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx025>
- [6] Stöcker-Meier, E. 1990. Theory of oceanic levelling for improving the geoid from satellite altimetry. *Bulletin géodésique*, Volume 64, Issue 3, pp. 247-258
- [7] Shen, Z.Y., Shen, W.B., Zhang, S.X. 2020. Unification of global height system at centimeter level using precise frequency signal links. *Physics.geo-ph.* <https://arxiv.org/abs/2008.05868>
- [8] Wu, H., Müller, J. 2020. Towards an International Height Reference Frame using clock networks. *International Association of Geodesy Symposia book series*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp 1-8. https://doi.org/10.1007/1345_2020_97
- [9] Rummel, R., Teunissen, P. 1988. Height datum definition, height datum connection and the role of the geodetic boundary value problem. *Bulletin géodésique*, 62(4):477–498
- [10] Pavlis, N., Holmes, S., Kenyon, S., Factor, J. 2008. An earth gravitational model to degree 2160: EGM2008. presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18 84(1):2–4
- [11] Bjerhammar, A. 1985. On a relativistic geodesy. *Bulletin Géodésique*, 59(3):207–220, <https://doi.org/10.1007/BF02520327>
- [12] Hoang, A. T., Shen, Z. Y., Shen, W. B., Cai, C. H., Xu, W., Ning, A. and Wu, Y. F., 2021. Determination of the Orthometric Height Difference Based on Optical Fiber Frequency Transfer Technique. *Geodesy and Geodynamics*, Vol. 12; 405–412. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.08.003>