

XÁC ĐỊNH DỊ THƯỜNG ĐỘ CAO TRONG ĐO VẼ BẢN ĐỒ ĐỊA HÌNH VÀ BỐ TRÍ CÔNG TRÌNH DÂN DỤNG - CÔNG NGHIỆP BẰNG CÔNG NGHỆ GNSS-RTK

Nguyễn Quang Thắng^{a,*}

^a*Khoa Trắc địa - Bản đồ và Quản lý đất đai, Trường Đại học Mở - Địa chất, số 8 phố Viên, quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 17/07/2019, Sửa xong 30/09/2019, Chấp nhận đăng 02/10/2019

Tóm tắt

Khi đo vẽ bản đồ địa hình và bố trí công trình dân dụng và công nghiệp bằng công nghệ GNSS - RTK, độ cao chuẩn của điểm chi tiết được xác định theo độ cao trắc địa của trạm base, chênh cao trắc địa đo được và dị thường độ cao nội suy; độ cao chuẩn của điểm bố trí thường được xác định theo độ cao chuẩn của trạm base và chênh cao trắc địa giữa điểm bố trí và trạm base. Trong bài báo đã xem xét các giải pháp nội suy dị thường độ cao điểm chi tiết theo các điểm khống chế GNSS có độ cao chuẩn; xác định khoảng cách cho phép từ trạm base đến điểm bố trí công trình dân dụng - công nghiệp khi ứng dụng công nghệ GNSS - RTK, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật của những công tác này. Tác giả cũng đã nghiên cứu phương pháp nội suy độ cao Geoid tại các điểm trong ô lưới có kích thước $1' \times 1'$ của mô hình trọng trường trái đất EGM-2008. Theo quan hệ tương đồng giữa độ chênh dị thường độ cao và độ chênh cao Geoid xác định được chênh cao chuẩn, từ đó tính được độ cao chuẩn của điểm chi tiết phục vụ đo vẽ bản đồ địa hình công trình dân dụng - công nghiệp.

Từ khóa: độ cao chuẩn; dị thường độ cao; công nghệ GNSS - RTK; công trình dân dụng - công nghiệp.

DETERMINING THE HEIGHT ANOMALIES WHEN TOPOGRAPHIC SURVEY AND STAKE OUT STRUCTURES OF CIVIL AND INDUSTRIAL WORKS BY GNSS-RTK TECHNOLOGY

Abstract

When topographic survey and staking out structures of civil and industrial works using GNSS - RTK technology, the normal height of the detail points are usually determined according to the geodetic height of the base station and the geodetic height difference measured and height anomalies are interpolated; the normal height of the points staked out are usually determined according to the normal height of the base station and the geodetic height difference between the base station and the point staked out. In the paper, we studied the solutions of height anomaly interpolation of detail points, according to the GNSS control points with normal height; determine the allowable distance from the base station to the stake out point of civil and industrial works when applying GNSS - RTK technology, meeting the technical requirements of these tasks. The author has also studied the method of Geoid height interpolation at the points in the $1' \times 1'$ grid of the earth gravity model EGM-2008. According to the similarity relationship between the difference of height anomaly and Geoid height difference, the difference of normal height is determined, from which calculating the normal height of the detail point is used for topographic survey in civil and industrial construction.

Keywords: normal height; height anomaly; GNSS - RTK technology; civil and industrial construction.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(5V\)-12](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(5V)-12) © 2019 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: mdathang@gmail.com (Thắng, N. Q.)

1. Đặt vấn đề

Trong xây dựng công trình, giải pháp xác định độ cao chuẩn với độ chính xác đáp ứng yêu cầu công việc luôn là vấn đề được quan tâm giải quyết. Hiện nay chênh cao trắc địa đo bằng công nghệ định vị vệ tinh toàn cầu (GNSS) có độ chính xác ngày càng cao. Do vậy sử dụng dữ liệu đo bằng công nghệ này để giải quyết vấn đề xác định độ cao trong xây dựng công trình có ý nghĩa quan trọng và đem lại hiệu quả cao. Trên khu vực xây dựng công trình, với việc sử dụng công nghệ GNSS trong đo vẽ bản đồ và bố trí công trình, cần xác định được độ cao chuẩn của các điểm bằng cách kết hợp các trị đo GNSS với trị đo cao hình học. Đã có nhiều công trình nghiên cứu về việc sử dụng phương pháp đo vệ tinh để xác định dị thường độ cao, cũng như phân tích mối quan hệ giữa độ cao trắc địa, độ cao chuẩn và độ cao chính như [1–3].

Trong [1] tác giả đã xem xét phương pháp xác định độ cao Geoid dựa trên các trị đo trọng lực; xác lập thuật toán xác định độ cao Geoid, sử dụng các trị đo GNSS để kiểm tra. Đã đề xuất thuật toán thay thế để xác định độ cao Geoid mà không cần sử dụng giá trị sơ bộ của vĩ độ trắc địa. Áp dụng thuật toán, tác giả đã sử dụng các tọa độ địa tâm (X, Y, Z) đo được cung cấp độ cao trắc địa để tính toán độ cao chuẩn đến giá trị nhỏ hơn 1000 m. Trong bài báo [2] tác giả bình luận về khái niệm “Đo cao vệ tinh” và thành quả của kỹ thuật định vị vệ tinh. Các giới hạn sử dụng của kỹ thuật này cũng đã được đề xuất trong bài báo.

Trong [4] tác giả phân tích: hiện nay trong xây dựng sử dụng độ cao chuẩn và thủy chuẩn hình học. Trong quá trình xây dựng thường xuất hiện nhu cầu chuyển độ cao qua các mặt địa hình khác nhau, chẳng hạn qua các con sông rộng hay lên các đỉnh núi cao. Trong các tình huống như vậy, việc truyền độ cao bằng công nghệ GNSS có hiệu quả cao hơn nhiều so với thủy chuẩn hình học. Trong bài báo đề xuất thuật toán xác định độ cao chuẩn từ dữ liệu đo vệ tinh với lưu ý số hiệu chỉnh do độ lệch dây dọi. Công nghệ GNSS được sử dụng để xác định tọa độ trắc địa hoặc tọa độ không gian địa tâm với Ellipsoid quy chiếu WGS-84.

Một số giải pháp xác định dị thường độ cao và độ cao chuẩn trên khu vực xây dựng công trình dân dụng và công nghiệp đã được xem xét trong [5, 6]. Khi đo vẽ bản đồ địa hình và bố trí công trình dân dụng và công nghiệp bằng công nghệ GNSS - RTK, tại trạm cố định (trạm base) đã biết độ cao trắc địa và độ cao chuẩn. Độ cao chuẩn của điểm chi tiết được xác định theo độ cao trắc địa của trạm base, chênh cao trắc địa đo được và dị thường độ cao nội suy; độ cao chuẩn của điểm bố trí thường được xác định theo độ cao chuẩn của trạm base và chênh cao trắc địa giữa điểm bố trí và trạm base.

Do vậy cần nghiên cứu các giải pháp nội suy dị thường độ cao điểm chi tiết theo các điểm khống chế GNSS có độ cao chuẩn; xác định khoảng cách cho phép từ trạm base đến điểm bố trí công trình dân dụng - công nghiệp khi ứng dụng công nghệ GNSS - RTK, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật của những công tác này.

Mặt khác, từ [7] có thể xác định được độ cao Geoid theo mô hình trọng trường trái đất EGM-2008 tại đỉnh các ô lưới có kích thước $1' \times 1'$. Nhờ đó có thể nội suy được độ cao Geoid tại điểm trong ô lưới theo các phương pháp nội suy khác nhau. Theo quan hệ giữa độ chênh dị thường độ cao và độ chênh cao Geoid xác định được chênh cao chuẩn, từ đó tính được độ cao chuẩn của điểm chi tiết phục vụ đo vẽ bản đồ địa hình công trình dân dụng - công nghiệp là vấn đề cần được quan tâm giải quyết.

2. Yêu cầu kỹ thuật khi ứng dụng công nghệ GNSS-RTK trong đo vẽ bản đồ địa hình và bố trí công trình dân dụng - công nghiệp

2.1. Mối quan hệ giữa các loại độ cao sử dụng trong trắc địa công trình

Ta đã biết mối quan hệ giữa độ cao trắc địa, độ cao chuẩn và dị thường độ cao thể hiện qua công thức:

$$H = h^\gamma + \zeta \quad (1)$$

Quan hệ giữa độ cao trắc địa, độ cao chính và độ cao geoid được biểu diễn:

$$H = h^g + N \quad (2)$$

Trong các công thức (1) và (2), H là độ cao trắc địa, h^γ là độ cao chuẩn, ζ là dị thường độ cao, h^g là độ cao chính, N là độ cao geoid của điểm xét.

Độ cao chuẩn của điểm được tính theo công thức:

$$h_i^\gamma = H_i - \zeta_i \quad (3)$$

2.2. Yêu cầu kỹ thuật khi ứng dụng công nghệ GNSS - RTK trong đo vẽ bản đồ địa hình và bố trí công trình dân dụng - công nghiệp

a. Yêu cầu kỹ thuật khi áp dụng công nghệ GNSS - RTK trong đo vẽ bản đồ địa hình công trình tỷ lệ lớn

Ở đây sẽ xem xét các yêu cầu kỹ thuật khi đo vẽ bản đồ địa hình công trình tỷ lệ 1:500 với khoảng cao đều $h = 0,5$ m. Theo [8] sai số trung phương tổng hợp vị trí điểm địa vật (m_P) và địa hình (m_h) trên khu vực xây dựng:

$$m_P \leq \pm 0,3M \text{ mm}; \quad m_h \leq \frac{h}{4} \quad (4)$$

trong đó M là mẫu số tỷ lệ bản đồ; h là khoảng cao đều của đường đồng mức.

Khi đo vẽ bản đồ địa hình bằng công nghệ GNSS - RTK, độ cao chuẩn của điểm chi tiết được xác định từ độ cao trắc địa và dị thường độ cao nội suy. Độ cao trắc địa của điểm chi tiết bằng độ cao trắc địa của trạm base cộng với chênh cao trắc địa đo được giữa trạm rover và trạm base.

Từ công thức (4), để ảnh hưởng của sai số nội suy dị thường độ cao điểm chi tiết (m_ζ) nhỏ không đáng kể so với các nguồn sai số khác cần đảm bảo điều kiện:

$$m_\zeta \leq \frac{m_h}{K}$$

Nếu nhận giá trị hệ số $K = 2,5$; $h = 0,5$ m tính được:

$$m_\zeta \leq \frac{h}{10} = \pm 5 \text{ cm}$$

b. Yêu cầu kỹ thuật khi áp dụng công nghệ GNSS - RTK trong bố trí công trình

Công nghệ GNSS - RTK được áp dụng để bố trí công trình trong trường hợp yêu cầu độ chính xác không cao (chủ yếu trong giai đoạn đào đắp đất). Khi đó yêu cầu độ chính xác bố trí $m_{h^\gamma} = \pm(2 \div 3)$ cm. Trong bố trí công trình thường lấy dị thường độ cao điểm bố trí bằng dị thường độ cao trạm base, nghĩa là độ cao chuẩn của điểm bố trí bằng độ cao chuẩn của trạm base cộng với chênh cao trắc địa giữa điểm bố trí (rover) và trạm base. Sai số trung phương độ cao chuẩn của điểm bố trí bằng công nghệ GNSS - RTK:

$$m_{h^\gamma}^2 = m_{h_{do}}^2 + m_\zeta^2 \quad (5)$$

trong đó $m_{h_{do}}$ là sai số đo chênh cao trắc địa; m_ζ là sai số dị thường độ cao điểm bố trí.

Từ đó tính được:

$$m_\zeta = \sqrt{m_{h^\gamma}^2 - m_{h_{do}}^2} \quad (6)$$

Giới hạn áp dụng, nghĩa là khoảng cách cho phép từ trạm base đến điểm bố trí có thể tính theo độ lệch dây dọi (θ) tại trạm base và m_ζ trong (6) dựa vào công thức:

$$S_{\max} = |m_\zeta| \frac{\rho}{\theta} \quad (7)$$

Độ lệch dây dọi xác định theo phương pháp trình bày ở nội dung tiếp theo.

3. Các giải pháp nội suy dị thường độ cao ứng dụng trong đo vẽ bản đồ địa hình và bố trí công trình dân dụng - công nghiệp

3.1. Giải pháp nội suy dị thường độ cao với số lượng các điểm GNSS đã biết độ cao chuẩn khác nhau

a. Khi biết độ cao chuẩn của ba điểm không chế GNSS

Khu vực xây dựng công trình dân dụng - công nghiệp thường có kích thước không lớn, lại nằm ở vùng đồng bằng hoặc trung du cận đồng bằng. Trong trường hợp đã biết độ cao chuẩn của ba điểm không chế GNSS trên khu vực, có thể áp dụng giải pháp sau đây để xác định độ cao chuẩn của điểm đo (điểm chi tiết, điểm bố trí) bằng công nghệ GNSS - RTK.

Từ ba điểm GNSS có độ cao chuẩn mặt Kvazigeoid, sử dụng phép nội suy song tuyến tính để nội suy dị thường độ cao các điểm khác trong phạm vi ba điểm này theo công thức [5, 9]:

$$\zeta_i = a_0 + a_1 B_i + a_2 L_i \quad (8)$$

trong đó B_i, L_i là tọa độ trắc địa của điểm i ; a_0, a_1, a_2 là các tham số cần xác định.

Công thức (8) viết dưới dạng ma trận:

$$\zeta = Aa \quad (9)$$

trong đó

$$A = \begin{bmatrix} 1 & B_1 & L_1 \\ 1 & B_2 & L_2 \\ 1 & B_3 & L_3 \end{bmatrix}; \quad a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}; \quad \zeta = \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \end{bmatrix}$$

Từ đó tính được:

$$a = A^{-1} \zeta \quad (10)$$

Dị thường độ cao tại điểm bất kỳ được tính dựa vào công thức (8), độ cao chuẩn của các điểm được tính theo công thức (3).

Các độ lệch dây dọi thành phần được tính theo công thức trong [9]:

$$\xi = -\frac{a_1}{R} \rho; \quad \eta = -\frac{a_2}{R \cos B} \rho \quad (11)$$

Độ lệch dây dọi toàn phần được tính:

$$\theta = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \quad (12)$$

b. Khi biết độ cao chuẩn từ ba điểm khống chế GNSS trở lên

Trong trường hợp này có thể giải quyết theo một trong hai cách sau:

- Lập lưới gồm các tam giác kề nhau, sau đó xác định phương trình mặt phẳng, từ đó tính được dị thường độ cao và độ lệch dây dọi ở các phần bề mặt này như đã trình bày ở mục a.

- Áp nguyên lý số bình phương nhỏ nhất (thuật toán bình sai gián tiếp) để xác định các tham số a_0, a_1, a_2 của mặt Kvazigeoid đại diện cho khu vực. Khi đó phương trình số hiệu chỉnh tương ứng với mỗi điểm GNSS đã biết độ cao chuẩn có dạng:

$$v_i = a_0 + a_1 B_i + a_2 L_i - \zeta_i \quad (13)$$

Áp dụng các công thức của bình sai gián tiếp để xác định và đánh giá độ chính xác các tham số. Việc tính dị thường độ cao và độ lệch dây dọi được thực hiện theo các công thức (8), (11) và (12).

c. Giải pháp nội suy dị thường độ cao theo trọng số dị thường của điểm khống chế

Khi biết độ cao chuẩn từ ba điểm khống chế GNSS trở lên, có thể nội suy dị thường độ cao theo ý tưởng của phương pháp “vòng tròn động” [10] dựa vào công thức:

$$\zeta = \frac{\sum_1^n \zeta_i P_i}{\sum_1^n P_i} \quad (14)$$

trong đó ζ là dị thường độ cao của điểm cần nội suy; ζ_i là dị thường độ cao của điểm khống chế GNSS thứ i đã biết độ cao chuẩn; P_i là trọng số của dị thường độ cao điểm khống chế i .

$$P_i = \frac{1}{d_i^n} \quad (15)$$

trong đó d_i là khoảng cách từ điểm nội suy đến điểm khống chế thứ i ; n là số mũ của khoảng cách khi tính trọng số của dị thường độ cao điểm khống chế i . Số mũ n được chọn để tối ưu mô hình bằng cách cho n thay đổi và nhận các giá trị $n = 2, 3, 4, \dots$

3.2. Giải pháp nội suy dị thường độ cao theo biến đổi độ cao Geoid dựa vào mô hình trọng trường EGM - 2008

a. Nội suy độ cao Geoid của điểm theo mô hình trọng trường EGM - 2008

Dựa vào mô hình Geoid EGM-2008 toàn cầu với độ phân giải $1' \times 1'$ [7], có thể nội suy độ cao Geoid của điểm P bất kỳ trong ô lưới 1234 (kích thước $1' \times 1'$) (Hình 1). Trên khu vực xây dựng công trình dân dụng - công nghiệp có thể coi dị thường độ cao không có những thay đổi đột xuất do ảnh hưởng của các khối địa hình, do vậy nên áp dụng phương pháp song tuyến tính để nội suy độ cao điểm nằm trong ô lưới.

Các công thức của phép nội suy song tuyến tính cho độ cao điểm P với lưu ý kích thước ô lưới là $1' \times 1'$ có dạng như sau:

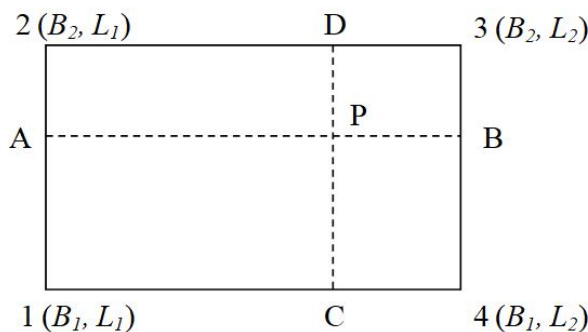
$$N_A = N_2 - (B_2 - B_p)(N_2 - N_1) \quad (16)$$

$$N_B = N_3 - (B_3 - B_p)(N_3 - N_4) \quad (17)$$

$$N_P = N_B - (L_3 - L_P)(N_B - N_A) \quad (18)$$

trong đó N_1, N_2, N_3, N_4, N_P là độ cao Geoid của các điểm 1, 2, 3, 4 và P.

Các giá trị độ cao Geoid N_1, N_2, N_3, N_4 được tra từ mô hình EGM-2008 toàn cầu theo vĩ độ B và kinh độ L của các điểm mắt lưới 1, 2, 3, 4.



Hình 1. Nội suy độ cao Geoid từ ô lưới trong mô hình EGM-2008 toàn cầu

b. Giải pháp nội suy dị thường độ cao theo biến đổi độ cao Geoid

Giải pháp này có trình tự thực hiện như sau:

- Xuất phát từ trạm base, nội suy độ cao Geoid của trạm base và điểm chi tiết đầu tiên dựa vào các công thức (16)–(18); tính hiệu số độ cao Geoid giữa điểm chi tiết này và trạm base, coi đó là chênh cao chuẩn để tính độ cao chuẩn của điểm chi tiết đầu tiên;

- Nội suy độ cao Geoid của điểm chi tiết thứ hai, tính hiệu số độ cao Geoid giữa điểm chi tiết thứ hai và điểm chi tiết đầu tiên, coi đó là chênh cao chuẩn để tính độ cao chuẩn của điểm chi tiết thứ hai;

- Quá trình nội suy và tính toán tiếp tục được thực hiện theo cách tương tự. Để kiểm tra, tiến hành tính khép độ cao về điểm khống chế GNSS đã biết độ cao chuẩn.

4. Tính toán thực nghiệm và phân tích kết quả

4.1. Dữ liệu thực nghiệm

Việc tính toán thực nghiệm được thực hiện trên mạng lưới khống chế trên khu vực xây dựng công trình công nghiệp (vùng đồng bằng ven biển tỉnh Hà Tĩnh - Hình 2). Trong mạng lưới này tiến hành đo GPS theo phương pháp đo tĩnh với độ chính xác tương đương lưới hạng IV quốc gia; đo thủy chuẩn hình học các tuyến đo trong lưới với chỉ tiêu hạng III Nhà nước. Các điểm trong lưới thực nghiệm có tọa độ và độ cao trắc địa; có 19 điểm khống chế vừa có độ cao trắc địa vừa có độ cao chuẩn.

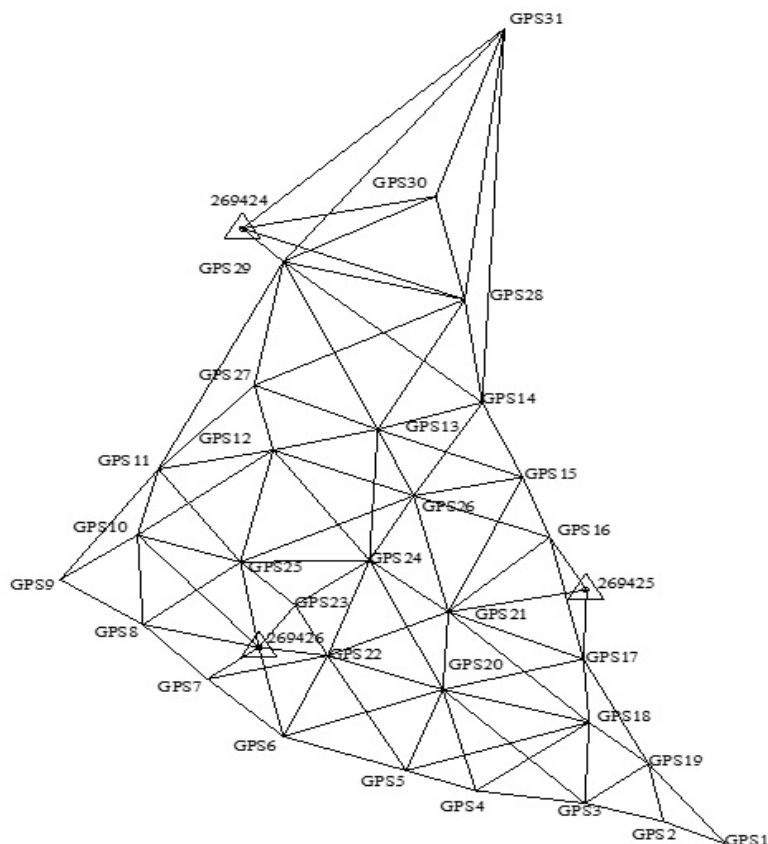
Theo Báo cáo kỹ thuật kết thúc công trình, sai số trung phương độ cao trắc địa của điểm yếu nhất có giá trị: $m_H = \pm 23$ mm, sai số trung phương độ cao chuẩn của điểm yếu nhất có giá trị: $m_{h^y} = \pm 3,88$ mm. Như vậy, từ công thức (1) có thể tính được sai số trung phương dị thường độ cao lớn nhất của các điểm trong lưới thực nghiệm:

$$m_{\zeta_{KC}} = \sqrt{m_H^2 + m_{h^y}^2} = \pm 23,32 \text{ mm}$$

Khi đo vẽ bản đồ tỷ lệ 1:500; $h = 0,5$ m; $m_\zeta \leq \pm 5$ cm, ta thấy:

$$\frac{m_{\zeta_{KC}}}{m_\zeta} < \frac{1}{2}$$

Điều đó có nghĩa là sai số trung phương dị thường độ cao các điểm trong lưới ảnh hưởng không đáng kể đến độ chính xác nội suy dị thường độ cao điểm chi tiết.



Hình 2. Sơ đồ mạng lưới khống chế sử dụng cho tính toán thực nghiệm

4.2. Nội suy dị thường độ cao với số lượng các điểm đã biết độ cao chuẩn khác nhau

a. Nội suy dị thường độ cao theo ba điểm khống chế trên khu vực

Việc nội suy được thực hiện theo 2 phương án:

- Phương án 1 (PA1): chọn ba điểm ngoài biên: 269424, GPS10, GPS1 làm các điểm khởi tính. Các hệ số được tính theo các công thức (8)–(10) và lập được phương trình:

$$\zeta_i = 177,130032 - 96,038602B_i - 80,241016L_i$$

Từ phương trình này xác định được dị thường độ cao cho 8 điểm nội suy trong mạng lưới nêu ở Bảng 1.

- Phương án 2 (PA2): chọn 8 tam giác bao quanh 8 điểm nội suy nêu ở Bảng 1: 269426-GPS23-GPS20, GPS22-GPS20-GPS16, GPS22-GPS17-GPS16, GPS21-269425-GPS15, GPS13-GPS14-GPS16, GPS17-GPS19-GPS20, GPS18-GPS20-269425, GPS18-GPS21-269425. Lập phương trình mặt phẳng đối với từng tam giác theo công thức (8)–(10), từ đó tính dị thường độ cao các điểm nội suy theo công thức (8).

b. Nội suy dị thường độ cao từ nhiều hơn ba điểm khống chế theo phương pháp số bình phương nhỏ nhất (phương án 3 - PA3)

Chọn 10 điểm khởi tính phân bố đều trên khu vực: 269424, 269425, 269426, GPS10, GPS12, GPS14, GPS21, GPS20, GPS18 và GPS1. Theo trình tự và các công thức đã nêu ở 3.1, tính các hệ số

và lập được phương trình:

$$\zeta_i = 212,432286 - 112,797682B_i - 96,406866L_i$$

Từ đó cũng tính dị thường độ cao cho 8 điểm nội suy nêu ở Bảng 1.

Tính độ lệch dây dọi theo các công thức (11), (12) cho điểm giữa lưới ($B = 18^\circ 3' 0''$):

$$\xi = 3,65''; \quad \eta = 3,28''; \quad \theta = 4,91''$$

Độ lệch dây dọi được sử dụng để tính khoảng cách cho phép từ trạm base đến điểm bố trí theo công thức (7), sử dụng trong bố trí công trình.

c. Giải pháp nội suy dị thường độ cao theo trọng số tính theo khoảng cách đến điểm khống chế

Trong thực nghiệm này, chọn số lượng điểm khống chế tham gia nội suy dị thường độ cao là ba điểm cho mỗi điểm nội suy. Các điểm khống chế và điểm nội suy (8 điểm) được lấy giống như Phương án 2. Dị thường độ cao điểm nội suy tính theo công thức (14).

Việc nội suy này được thực hiện theo 2 phương án nhỏ:

- Phương án 4a (PA4a): khi tính trọng số theo công thức (15), chọn số mũ $n = 2$;
- Phương án 4b (PA4b): khi tính trọng số theo công thức (15), chọn số mũ $n = 3$.

Từ dị thường độ cao nội suy, tính độ chênh dị thường cho từng điểm:

$$\delta\zeta = \zeta_{KC} - \zeta_{ns}$$

Sai số trung phương dị thường độ cao nội suy được tính theo công thức:

$$m_{\zeta}^{ns} = \sqrt{\frac{\sum (\delta\zeta)^2}{n}} \quad (19)$$

trong đó n là số lượng điểm nội suy.

Khoảng cách trung bình của các cạnh từ điểm nội suy đến điểm khống chế trong 8 tam giác bao quanh các điểm nội suy: $D_{tb} = 1,303$ km.

Kết quả tính toán $\delta\zeta$ và m_{ζ}^{ns} theo các phương án nêu trên được nêu ở Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả tính toán độ chính xác dị thường độ cao các điểm nội suy

TT	Điểm nội suy	ζ_{KC} (m)	$\delta\zeta$ (m)				
			PA1	PA2	PA3	PA4a	PA4b
1	GPS22	-2,1039	0,0168	0,0019	0,0124	0,0060	0,0050
2	GPS21	-2,1629	-0,0134	-0,0134	-0,0122	-0,0260	-0,0286
3	GPS21	-2,1629	-0,0134	-0,0143	-0,0122	-0,0053	-0,0066
4	GPS16	-2,2004	-0,0179	-0,0031	-0,0105	-0,0069	-0,0052
5	GPS15	-2,2094	-0,0173	-0,0008	-0,0083	-0,0047	-0,0047
6	GPS18	-2,1355	0,0104	0,0109	0,0115	0,0187	0,0204
7	GPS17	-2,1763	-0,0168	-0,0158	-0,0132	-0,0266	-0,0257
8	GPS17	-2,1763	-0,0168	-0,0156	-0,0132	-0,0157	-0,0170
			±0,0155	±0,0112	±0,0118	±0,0163	±0,0170

d. Bình luận

Từ kết quả tính toán ở Bảng 1 có thể rút ra một số nhận xét sau:

- Phương án 2 (lấy các tam giác diện tích nhỏ bao quanh điểm nội suy) và Phương án 3 (nội suy dựa vào mặt phẳng xác định theo nguyên lý số bình phương nhỏ nhất) có sai số trung phương dị thường độ cao nội suy nhỏ hơn so với các phương pháp tính còn lại. Phương pháp nội suy dị thường độ cao theo trọng số tính theo khoảng cách đến điểm khống chế có sai số trung phương lớn nhất, tuy nhiên chênh lệch so với giá trị tương ứng của các phương pháp khác không lớn.

- Tất cả các phương án tính đều có sai số trung phương dị thường độ cao nội suy nhỏ hơn nhiều so với giá trị sai số trung phương nội suy cho phép ($m_{\zeta} = \pm 5$ cm).

4.3. Nội suy và tính toán độ chênh cao Geoid theo mô hình trọng trường EGM-2008 và so sánh với chênh cao chuẩn

Trên sơ đồ lưới thực nghiệm, tính độ chênh cao từ độ cao chuẩn và độ chênh cao Geoid trên 28 cạnh nêu ở Bảng 2, trong đó độ cao Geoid của các điểm đầu và cuối cạnh được nội suy từ mô hình trọng trường EGM-2008 theo các công thức (16), (17) và (18). Tiếp đó tính độ chênh lệch chênh cao theo các cạnh nêu trên:

$$\delta\Delta h = \Delta h^y - \Delta N_{2008} \quad (20)$$

trong đó Δh^y là chênh cao chuẩn của cạnh; ΔN_{2008} là chênh cao Geoid của cạnh tính theo kết quả nội suy độ cao điểm từ mô hình EGM-2008.

Bảng 2. Kết quả so sánh độ chênh cao chuẩn và độ chênh cao Geoid

Cạnh	ΔN_{2008} (m)	Δh (m)	$\delta\Delta h$ (m)	Cạnh	ΔN_{2008} (m)	Δh (m)	$\delta\Delta h$ (m)
GPS1–GPS2	1,297	1,269	-0,028	GPS16–GPS21	-0,547	-0,553	-0,006
GPS1–GPS19	-2,079	-2,113	-0,034	GPS17–GPS18	0,683	0,671	-0,012
GPS2–GPS19	-3,375	-3,382	-0,007	GPS17–GPS20	-0,989	-1,032	-0,043
GPS10–GPS11	-0,142	-0,159	-0,017	GPS17–GPS21	-1,149	-1,187	-0,038
GPS10–GPS12	-0,644	-0,642	0,002	GPS18–GPS20	-1,672	-1,703	-0,031
GPS11–GPS12	-0,502	-0,483	0,019	GPS18–GPS21	-1,832	-1,858	-0,026
GPS12–GPS13	-0,340	-0,353	-0,013	GPS18–GPS19	1,896	1,922	0,026
GPS13–GPS14	0,710	0,722	0,012	GPS20–GPS21	-0,160	-0,155	0,005
GPS13–GPS15	0,016	0,053	0,037	GPS20–GPS22	0,554	0,544	-0,010
GPS14–GPS15	-0,695	-0,669	0,026	GPS21–GPS22	0,714	0,699	-0,015
GPS15–GPS16	0,401	0,420	0,019	GPS21–269425	0,830	0,850	0,020
GPS15–GPS21	-0,145	-0,133	0,012	GPS22–GPS23	0,729	0,727	-0,002
GPS16–269425	0,283	0,297	0,014	GPS22–269426	0,924	0,941	0,017
GPS16–GPS17	0,603	0,634	0,031	GPS23–269426	0,194	0,214	0,020

Tính trọng số của các chênh lệch độ chênh cao:

$$P_{\delta\Delta h} = \frac{1}{D}$$

trong đó D là chiều dài cạnh (km).

Chiều dài trung bình của 28 cạnh nêu trên: $D_{tb} = 1,388$ km. Từ đó tính sai số trung phương độ chênh cao:

$$m_{\Delta h} = \sqrt{\frac{P(\delta\Delta h)^2}{n}} \quad (21)$$

với n là số cạnh tham gia tính độ chênh cao ($n = 28$).

Kết quả tính toán sai số trung phương độ chênh cao theo công thức (21): $m_{\Delta h} = 18,8$ mm/km.

Từ kết quả tính ở Bảng 2 và sai số trung phương độ chênh cao trên lưới thực nghiệm, có thể rút ra các nhận xét:

- Các độ chênh cao chuẩn và độ chênh cao Geoid tính theo kết quả nội suy từ mô hình EGM-2008 trên tất cả các cạnh đều có cùng dấu; giá trị độ chênh nhỏ nhất: $\delta\Delta h_{\min} = 0,002$ m; độ chênh lớn nhất: $\delta\Delta h_{\max} = 0,043$ m. Điều đó chứng tỏ tính phù hợp của bề mặt Kvazigeoid với bề mặt Geoid trên khu vực đang xét.

- Sai số trung phương độ chênh cao nhận được tương đương với thủy chuẩn kỹ thuật, đáp ứng được yêu cầu đo vẽ bản đồ tỷ lệ lớn với hầu hết các khoảng cao đều.

5. Kết luận

Từ kết quả nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm, có thể rút ra một số kết luận sau:

- Trong các phương pháp nội suy dị thường độ cao, nên áp dụng phương pháp nội suy song tuyến tính theo tam giác nối các điểm khống chế gần nhất, hoặc phương pháp dựa vào mặt phẳng thiết lập theo nguyên lý số bình phương nhỏ nhất để nội suy dị thường độ cao điểm chi tiết trong đo vẽ bản đồ địa hình công trình dân dụng - công nghiệp.

- Giải pháp nội suy dị thường độ cao điểm chi tiết trong đo vẽ bản đồ địa hình, cũng như xác định phạm vi ứng dụng công nghệ GNSS - RTK trong bố trí công trình dân dụng - công nghiệp trình bày trong bài báo là có cơ sở khoa học, dễ dàng thực hiện trong thực tế sản xuất trắc địa hiện nay.

Tài liệu tham khảo

- [1] Balandin, V. N., Menchikov, I. V., Firsov, Y. G., Efanov, A. I. (2016). [The determination of height anomaly by satellite methods](#). *Geodesy and Cartography*, 908(2):11–16.
- [2] Brovar, B. V., Gorobets, V. P., Popadyev, V. V. (2015). [On the satellite leveling](#). *Geodesy and Cartography*, 895(1):2–4.
- [3] Kureniov, Y. P., Malik, T. N. (2017). [Definition of geodetic height namely by measured geocentric coordinates](#). *Geodesy and Cartography*, 921(3):20–23.
- [4] Mustafin, M. G., Son, T. T. (2018). [Method for determining the normal heights from satellite data, taking into account the deviations of the plumb lines](#). *Geodesy and Cartography*, 937(7):2–10.
- [5] Thắng, N. Q., Huy, D. C. (2017). Một số giải pháp nâng cao hiệu quả ứng dụng công nghệ GPS trong xây dựng nhà cao tầng và công trình công nghiệp. *Tạp chí Khoa học công nghệ Xây dựng*, (176):63–69.
- [6] Thắng, N. Q., Hà, V. T., Trang, D. C. (2017). Solution for reduction of effects of some factors on accuracy of staking out axis to working platforms in construction of skyscraper. *The International Conference on Geo-Spatial Technologies and Earth Resources*, Hanoi, Vietnam, 67–73.
- [7] Nikolaos, K. P., Simon, A. H., Stive, C. K., John, K. F. (2008). An earth gravitational model to degree 2160: EGM2008. *EGU General Assembly, Vienna, Austria*.
- [8] TCVN 9398:2012. *Công tác trắc địa trong xây dựng công trình - Yêu cầu chung*. Hà Nội.
- [9] Bernhard, H.-W., Helmut, M. (2005). *Physical Geodesy*. Springer Wien-New York.
- [10] Hiến, P. V., nnk (2001). *Trắc địa công trình*. Nhà xuất bản Giao thông vận tải.