

V. Staroverov, K. Nikitenko

EVALUATION OF ACCURACY OF DISTANCE DIAGNOSTICS OF THE PIPELINE WITH THE USE OF SUPERCAM SUPPLY SERIES

The paper considers the methods of remote diagnostics of the pipeline, their advantages and disadvantages. Different classes of unmanned aerial vehicles (UAVs) have been analyzed, which can provide savings when carrying out a number of works in comparison with traditional methods. In addition, they can enhance the safety of the work, their quality.

The use of Supercam series UAVs has been proposed, their accuracy and significant contribution to conducting engineering-geodetic surveys for the gas transmission system have been determined. In fact, a properly constructed work process, aerial photography using UAV will have an even greater advantage, not only in the speed of work, but also the quality and content of topographic plans will significantly increase. The UAV becomes a tool, a means of measurement similar to a tacheometer, a laser scanner. This will significantly reduce the percentage of marriage, which eliminates the need to re-enter the site and to refine or eliminate mistakes made in the survey, and this is a considerable saving of money for the organization. All this will allow the development of projects for monitoring the pipeline system to a new level.

Unmanned aerial vehicle for geodesy provides specialists with data that allows the development of monitoring of the pipeline, taking into account rational use and environmental protection, to predict changes in the natural environment of the site under the influence of construction and operation of the pipeline.

Keywords: gas pipeline, unmanned aerial vehicles (UAVs), drone, remote diagnostics, digital surface model (DSM).

Надійшла до редакції

12.03.2018

УДК 528.33, 528.31

К.Р. Третяк, д-р техн. наук, професор,
М.В. Дума, аспірант,
кафедра вищої геодезії та астрономії
Національний університет «Львівська політехніка»

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ І ЗГУЩЕННЯ ІНЖЕНЕРНИХ ГНСС-МЕРЕЖ

Розроблено методику оптимізації конфігурації ГНСС-мереж із урахуванням схеми вимірювань та середньої квадратичної похибки визначення координат. Запропонована методика ґрунтується на алгоритмі послідовного вилучення спотворених вимірювань до досягнення необхідної точності ГНСС-мережі. Застосування запропонованої методики забезпечує покращення середньої квадратичної похибки визначення координат і зниження вартості виконання

© К.Р. Третяк, М.В. Дума, 2018

вимірювань. Встановлено, що подану методику можна застосувати для оптимізації ГНСС-мереж різної геометричної форми та схеми вимірювань.

Ключові слова: оптимізація, конфігурація, ГНСС-мережа, схема вимірювань, детермінант коваріаційної матриці.

Вступ. У процесі будівництва різноманітних інженерних споруд, що можуть становити підвищену небезпеку для людей і довкілля, створюють опорні геодезичні мережі, які використовують для супроводу будівництва та контролю за їх стійкістю. Широке використання супутникових технологій потребує розроблення нових методик й алгоритмів проектування й оптимізації ГНСС-мереж, які практично витіснили класичні лінійно-кутові побудови та частково – нівелювання. Процес проектування й оптимізації геодезичних мереж полягає в розробленні точних і надійних мереж, які в той же час будуть економічно ефективними [3].

Аналіз досліджень і публікацій. Оптимізацією геодезичних мереж займалось багато вітчизняних і зарубіжних вчених ще майже півстоліття тому, ця проблема залишається актуальною і в наш час. Автор статті [6] виокремлює чотири етапи проектування й оптимізації геодезичних мереж різного призначення.

Нульовий етап (Zero-Order Design) – вибір оптимальної системи відліку. На цьому етапі добирають оптимальну систему координат для мережі. Проте цей етап можна пропустити у проектуванні локальних мереж.

Перший етап (First-Order Design) – вибір оптимальної конфігурації мережі. На цьому етапі добирають оптимальну геометричну форму мережі, оптимальну кількість і розміщення геодезичних пунктів та схеми вимірювань.

Другий етап (Second-Order Design): вибір оптимальних ваг спостережень. На цьому етапі визначають, яка точність має бути досягнута. Основною характеристикою етапу є точність.

Третій етап (Third-Order Design) – покращення існуючої мережі шляхом додавання (або видалення) додаткових пунктів і спостережень.

Найбільш поширеним є перший етап оптимізації, оскільки він ґрунтується на виборі оптимальної геометричної форми та схеми вимірювань у мережі. Як приклад у статті [8] представлено методику оптимізації схеми вимірювань у мережі з 16 пунктів (виміряно 83 лінії та 104 кути). В результаті оптимізації встановлено, що завдяки зменшенню кількості ліній і кутів, які потрібно виміряти, на 66% та 55% відповідно, можна забезпечити необхідну точність визначення координат пунктів. Тимчасом у публікації [7] представлено методику, що полягає у підвищенні точності визначення координат шляхом додавання нових векторів у мережу із 25 ГНСС-пунктів (Аль Дхаммас, Ірак).

У статті [9] представлено алгоритми оптимізації геометрії ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС (Україна). У мережу з 43 пунктів додано чотири нових пункти і видалено з програми вимірювань стільки ж «слабких» пунктів. Оптимізацію виконували на основі значення детермінанта коваріаційної матриці. Подібний підхід використано й у роботах інших авторів [4; 5], у яких описано оптимізацію з використанням параметра надійності та значення детермінанта

коваріаційної матриці. В обох випадках обирають геометричну форму мережі, значення точності і надійності вимірювань в якій будуть найкращими. У роботі [3] викладено алгоритм оптимізації геодезичної мережі моніторингу, що включає перший другий і третій етапи. На першому етапі виконано заміну «слабких» точок мережі на жорсткі. На другому етапі збільшується кількість надлишкових вимірювань для точок, які розміщені по периметру мережі. А на третьому етапі для підвищення надійності додають зворотні вимірювання «слабких» ліній.

Проте в згаданих статтях не розглядаються питання сумісної оптимізації схеми вимірювань і конфігурації мережі із забезпеченням необхідної точності. Це питання залишається актуальним, оскільки іноді виникає потреба оптимізувати вже існуючу мережу (видалити слабкі пункти, замінити пошкоджені чи закласти нові) або створити нову.

Постановка завдання. У публікації представлено розроблену методику сумісної оптимізації геометрії розміщення пунктів відповідно до умови мінімальної кількості вимірів у мережі та досягнення допустимої похибки у визначенні координат пунктів. Методика ґрунтується на покроковому вилученні векторів зі схем вимірів та уточненні місцеположення пунктів.

Основна частина. Розроблення методики оптимізації ГНСС-мережі. Для супроводу будівництва, а в подальшому й моніторингу інженерних споруд створюють і згодом розширюють опорні геодезичні мережі. Для цих потреб широко використовують супутникові технології, що потребує розроблення нових методик й алгоритмів проектування та оптимізації ГНСС-мереж, які практично витіснили класичні методи.

Попередній проект мережі не має чітко визначених координат пунктів згущення, розміщення яких підлягає оптимізації, їх положення позначене зонами, в межах яких вони можуть знаходитись, а за вихідні взято координати центрів цих зон. Після вибору зон допустимого розміщення пунктів обирають значення середньої квадратичної похибки визначення координат «найслабшого» пункту, яке треба забезпечити.

Завдання цієї методики – отримати на виході мережу з оптимальною конфігурацією та схемою вимірювань, яка забезпечить необхідну точність визначення координат пункту за мінімальної тривалості виконання робіт, що призведе до зменшення їх вартості.

Для оптимізації ГНСС-мереж запропоновано універсальну методику, яка ґрунтується на почерговому вилученні зі схеми вимірювань векторів та пошуку оптимального положення для вибраних пунктів ГНСС-мережі. Процес вилучення має тривати до досягнення M_{xy} заданої межі або залишення мінімальної кількості векторів, потрібних для врівноваження, коли ця межа не встановлена. Для реалізації методики використано програмне забезпечення MathCAD15.

Відповідно до запропонованої методики в модельній ГНСС-мережі виконано послідовне вилучення векторів, які за результатами врівноваження мали найбільші значення поправок [1]:

$$v = A \cdot \Delta x + L, \quad (1)$$

де A – матриця коефіцієнтів рівнянь поправок; Δx – поправки у наближені значення шуканих параметрів, які визначають з урівноваження; L – матриця-вектор вільних членів.

Тобто припускалось, що вектори з максимальними поправками є векторами, які мають найбільші значення похибок [2].

Після кожного видалення виконують пошук оптимального положення для вибраних пунктів ГНСС-мережі, оптимальні координати яких можна визначити за залежністю:

$$\begin{aligned} x_i^l &= x_i + S_i^l \cdot \cos(\alpha_i); \\ y_i^l &= y_i + S_i^l \cdot \sin(\alpha_i), \end{aligned} \quad (2)$$

де x_i та y_i – початкові координати обраних пунктів ГНСС-мережі; α_i – напрямок руху кожного пункту, при якому спостерігається покращення значень цільової функції; S_i^l – відстань, на яку треба перемістити пункт в напрямку α_i .

Напрямок руху кожного пункту визначають за градієнтним методом, що ґрунтується на пошуку приростів цільової функції [9]:

$$\operatorname{tg}(\alpha_i) = \frac{\nabla y_i}{\nabla x_i}, \quad (3)$$

де $\nabla x_i = \frac{F(x_i + l, y_i) - F(x_i - l, y_i)}{2 \cdot l}$ – приріст цільової функції по осі X ;

$\nabla y_i = \frac{F(x_i, y_i + l) - F(x_i, y_i - l)}{2 \cdot l}$ – приріст цільової функції по осі Y ; l – стала

величина, на яку змінювали кожен координату (в цій методиці рекомендовано використовувати 1 м); $F(x, y)$ – цільова функція.

Оскільки по заданому напрямку пункт може переміщуватись до нескінченності, то завдання з оптимізації може втратити сенс, тому на процес оптимізації накладено обмеження (радіус зони, в межах якої можна переміщувати пункт, – R). У результаті цільова функція набуде вигляду:

$$\Phi(x, y) = F(x, y) + k \begin{cases} (S_i^l - R_i) \leq 0 & \Rightarrow k = 0, \\ (S_i^l - R_i) > 0 & \Rightarrow k = (S_i^l - R_i) \cdot m, \end{cases} \quad (4)$$

де m – стала величина, яка залежить від кількості пунктів у мережі.

Слід зазначити, що в пропонованій методиці як цільову функцію використано нормований детермінант коваріаційної матриці [2]:

$$D^{norm} = \sqrt[n]{|Q_x|}, \quad (5)$$

де Q_x – коваріаційна матриця; n – кількість пунктів у мережі.

Відомо, що детермінант відповідає об'єму гіпереліпсоїда похибок, утвореного кореляційною матрицею, у зв'язку з цим мінімізація критерію є хорошим методом підвищення точності мережі, тому вирішено використати саме цей критерій.

Після кожної ітерації вилучення зі схеми вимірювань векторів та пошуку оптимального положення визначають середню квадратичну похибку визначення координат «найслабшого» пункту ГНСС-мережі за виразом:

$$M_{xy} = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot Q_{x_i, i}} \quad (6)$$

де $\mu = \sqrt{\frac{\sum v^2}{r}}$ – середня квадратична похибка одиниці ваги; $Q_{x_i, i}$ – відповідний діагональний елемент коваріаційної матриці; r – кількість надлишкових вимірів у мережі.

Процес вилучення виконують до досягнення M_{xy} заданої межі, якщо ця межа не встановлена, то до залишення мінімальної кількості векторів, потрібних для врівноваження $t_{\min} = \frac{3n-2}{2}$. Якщо кількість векторів буде меншою від t_{\min} , то координати як мінімум одного пункту будуть визначені безконтрольно.

Апробація розробленої методики оптимізації ГНСС-мережі. Для апробації розробленої методики використано модельну ГНСС-мережу з 14 пунктів (рис. 1), радіус зони допустимого розміщення пунктів згущення – 150 м, середня квадратична похибка визначення координат «найгіршого» пункту – 2 мм. Розміщення трьох пунктів мережі потребує уточнення, тобто їх положення буде змінюватись, решта пунктів взято за вихідні. Оптиміальні координати трьох обраних пунктів будуть відшукуватись в радіусі 150 м від їх вихідного положення межею.

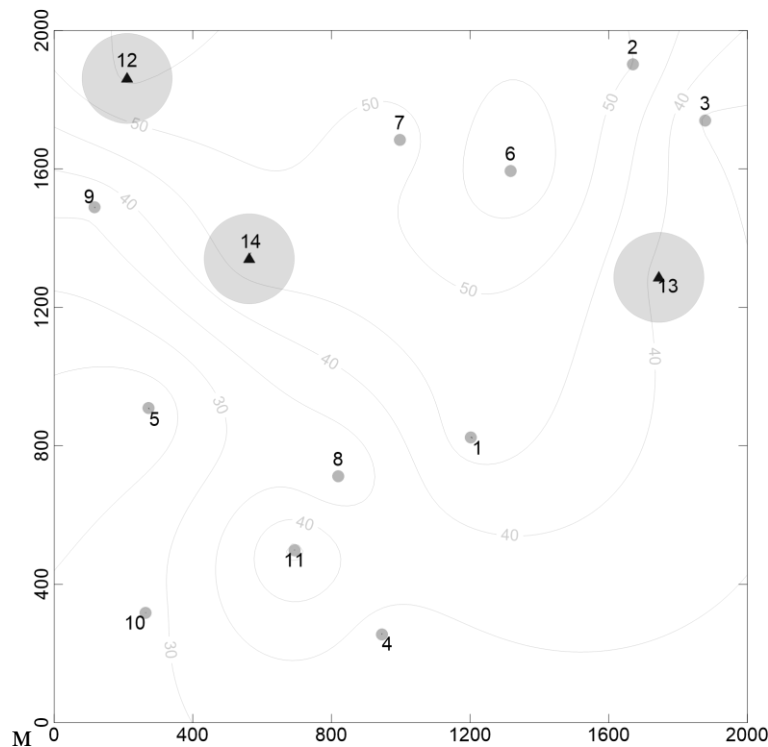


Рис. 1. Схема модельної ГНСС-мережі:

- - вихідні пункти мережі, ▲ - пункти згущення мережі, ● - зони допустимого розміщення пунктів згущення мережі

У даній мережі виконано також моделювання вимірювань всіх можливих ГНСС-векторів, їх кількість дорівнює $t_{\max} = \frac{n(n-1)}{2}$, де n - кількість пунктів

мережі. Слід зазначити, що для моделювання похибок вимірювань використано нормальний закон розподілу. На рис. 2 представлено гістограму розподілу модельних похибок ГНСС-вимірювань Δ .

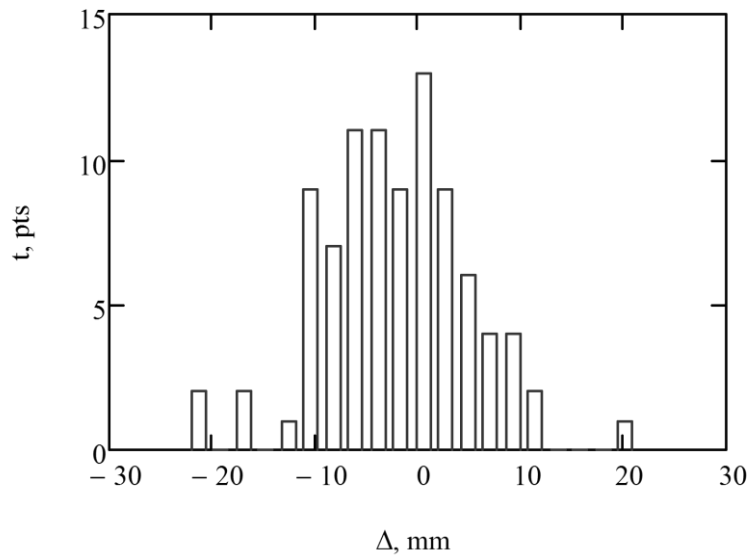


Рис. 2. Гістограма розподілу модельних похибок ГНСС-вимірювань Δ

На гістограмі видно, що більшість похибок – в межах, близьких до нуля, проте є похибки, значення яких суттєво перевищують загальний фон. Аналогічну картину зауважуємо і в реальних вимірах, що зумовлено незадовільною видимістю супутників, особливістю об’єкта або багатошляховістю сигналу.

На основі почергового вилучення зі схеми вимірювань векторів і пошуку оптимального положення побудовано графік зміни значень визначення координат «найслабшого» пункту (рис. 3).

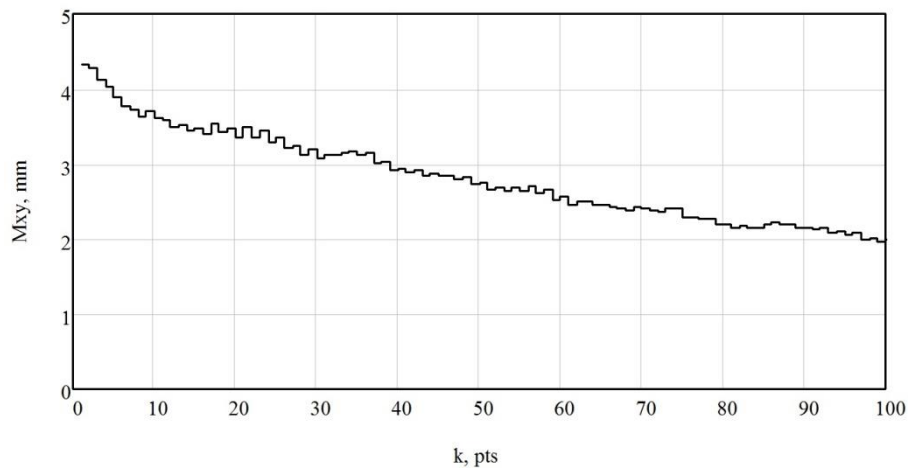


Рис. 3. Зміна значень середньої квадратичної похибки визначення координат «найслабшого» пункту при послідовному вилученні векторів із максимальними похибками

Як видно з графіків, значення середньої квадратичної похибки визначення координат «найслабшого» пункту M_{xy} на початку відсіювання векторів змінюється (зменшується) швидше, ніж в подальшому. Це пов’язано з тим, що

першими відсіюються вектори, які містять найбільші поправки [1]. Оскільки наприкінці вилучають вектори з мінімальними поправками, то й зміна M_{xy} є повільнішою, що чітко відображено на графіку.

Для даної модельної мережі значення середньої квадратичної похибки визначення координат «найслабшого» пункту встановлено 2,0 мм. Для того щоби забезпечити таку точність, треба виконати 100 ітерацій, тобто зі схеми вимірювань вилучити 50 векторів, а це 55%. Після оптимізації схема вимірювань в даній ГНСС-мережі набула вигляду, як на рис. 4, а значення M_{xy} зменшилось з 4,3 мм до 2,0 мм.

Після видалення векторів одержано мережу з новим, оптимальним розміщенням пунктів, відповідним цій схемі вимірювань. Переміщення пунктів з початкових положень зображено на рис. 4.

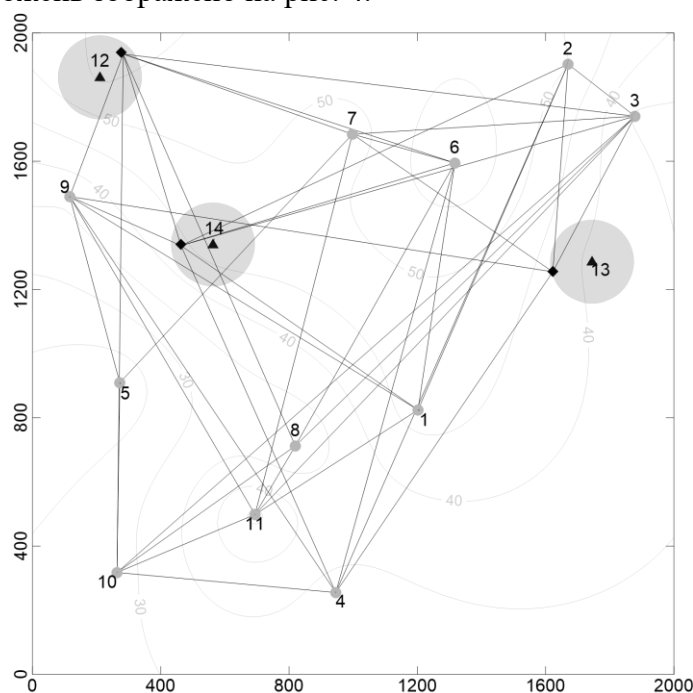


Рис. 4. Оптимальна геометрія та схема вимірювань в мережі після завершення процесу оптимізації (видалено 50 векторів)

- - вихідні пункти мережі, △ - початкове положення пунктів згущення мережі,
- ◆ - оптимальне положення пунктів згущення мережі, ● - зони допустимого розміщення пунктів згущення мережі, — - необхідні вектори

Аналізуючи отримані результати, можна дійти висновку, що при кожній схемі вимірювань оптимальною буде інша конфігурація мережі, тому під час закладання нових пунктів чи проектування нових мереж варто звернути на це увагу. Виходячи з необхідної точності визначення координат, можна скласти схему вимірювань, на основі котрої закласти нові пункти, положення яких буде найкращим.

Методику випробувано на великій кількості ГНСС-мереж, виявлено, що її можна застосовувати для всіх типів локальних ГНСС-мереж.

Висновок. Розроблена методика оптимізації геометрії мережі з урахуванням

схеми вимірювань може бути застосовувана як під час розширення існуючих ГНСС-мереж, так і під час проектування нових. Вона полягає у вилученні векторів зі схеми вимірювань, у якій після кожного вилучення вектора було знайдено оптимальне положення обраних пунктів мережі та обраховане значення середньої квадратичної похибки визначення координат пункту. Це дає можливість виходячи із забезпечення необхідної точності дібрати схему вимірювань та визначити оптимальну конфігурацію мережі. Видалення векторів сприятиме зменшенню часу спостережень, отже, й зниженню вартості робіт, що є позитивним, а іноді й вирішальним фактором.

Описану методику апробовано на модельній ГНСС-мережі, що складалась з 14 пунктів, де були виміряні всі вектори. В результаті проведеної оптимізації для забезпечення значення середньої квадратичної похибки визначення координат пункту 2 мм з початкової схеми видалено 55% векторів та знайдено оптимальні положення обраних пунктів, що дало змогу суттєво зменшити час спостережень, отже, і вартість робіт.

Проте через видалення векторів зменшується кількість надлишкових вимірювань у мережі, що негативно впливає на жорсткість мережі, змінюється також і надійність, тому дослідження в цьому напрямі буде продовжено.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Третяк К. Р.* Апостеріорна оптимізація геодезичних мереж / К.Р Третяк // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2003. – С. 127 – 141.
2. *Третяк К. Р.* Розроблення методики розрахунку надійності активних геодезичних мереж / К.Р Третяк, І.Р. Савчин // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2013. – №77 – С. 122 – 126.
3. *Amiri-Simkooei A.* Strategy for designing geodetic network with high reliability and geometrical strength / A. Amiri-Simkooei // Journal of surveying engineering. – 2001. – P. 104-117.
4. *Amiri-Simkooei A.* Analytical first-order-design of geodetic networks / A. Amiri-Simkooei // Iranian journal of engineering sciences – 2007. – № 1(1). – P. 1-14.
5. *Berne J.* First-order design of geodetic networks using the simulated annealing method / J. Berne, S Baselga // Journal of Geodesy – 2004. – № 78. – P. 47-54.
6. *Grafarend E.* Optimization of geodetic networks / E. Grafarend// Bolletino di Geodesia a Science Affini. – 1974. – №33. – P. 351 – 406.
7. *Oday Y.M.* GNSS Baseline Configuration Based on First Order Design / Y.M. Oday, A.H. Zahraa, Y.A. Muayed // Journal of Engineering. – 2015. – № 21. – P. 100-114.
8. *Pachelski W.* Optimization of observation plan based on the stochastic characteristics of the geodetic network/ W. Pachelski, P. Post // Reports on Geodesy and Geoinformatics – 2016. – № 101. – P. 16-26.
9. *Savchyn I.R.* Dnister PSPP control GNSS network optimization/ I.R. Savchyn, M.V. Duma // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2016. – №84. – P. 17 – 24.

REFERENCES

1. Tretyak K.R. (2003). Aposteriorna optymizacija gheodezychnykh merezh [Posteriori optimization of geodetic networks]. *Suchasni dosjaghnennja gheodezychnoji nauky ta vyrobnytva – Modern geodesic advances of science and industry*, 127-141 [in Ukrainian].
2. Tretyak K.R., & Savchyn I.R (2013). Rozroblennia metodyky rozrakhunku nadiinosti aktyvnykh gedezychnykh merezh [Development of the method for calculating the reliability of active geodetic networks]. *Geodeziia, kartohrafia i aerofotoznimannia – Geodesy, cartography and aerial photography* 77, 122 – 126 [in Ukrainian].
3. Amiri-Simkooei A. (2001). Strategy for designing geodetic network with high reliability and geometrical strength. *Journal of surveying engineering*, 104-117.
4. Amiri-Simkooei A. (2007). Analytical first-order-design of geodetic networks. *Iranian journal of engineering sciences*, 1(1), 1-14.
5. Berne´ J. & S Baselga (2004). First-order design of geodetic networks using the simulated annealing method. *Journal of Geodesy*, 78, 47-54.
6. Grafarend E. (1974). Optimization of geodetic networks. *Bolletino di Geodesia a Science Affini*, 33, 351 – 406.
7. Oday Y.M. & Zahraa A.H. & Muayed Y.A (2015). GNSS Baseline Configuration Based on First Order Design. *Journal of Engineering*, 21, 100-114.
8. Pachelski W. & Postek P. (2016). Optimization of observation plan based on the stochastic characteristics of the geodetic network. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 101, 16-26.
9. Savchyn I.R. & Duma M.V (2016). Dnister PSPP control GNSS network optimization. *Geodeziia, kartohrafia i aerofotoznimannia – Geodesy, cartography and aerial photography*, 84, 17 – 24.

К.Р. Третьак, М.В. Дума

**ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СГУЩЕНИЕ
ИНЖЕНЕРНЫХ ГНСС-СЕТЕЙ**

Разработана методика оптимизации конфигурации ГНСС-сетей с учетом схемы измерений и средней квадратической погрешности определения координат. Предложенная методика основана на алгоритме последовательного удаления искаженных измерений до достижения требуемой точности ГНСС-сети. Использование предложенной методики обеспечивает улучшение средней квадратической погрешности определения координат и снижение стоимости выполнения измерений. Установлено, что представленную методику можно применить для оптимизации ГНСС-сетей различной геометрической формы и схемы измерений.

Ключевые слова: оптимизация, конфигурация, ГНСС-сеть, схема измерений, детерминант ковариационной матрицы.

**OPTIMAL DESIGN AND THICKENING ENGINEERING
GNSS-NETWORK**

The methodology of optimization of GNSS networks configuration of with the consideration of the measurement scheme and the mean squared error of coordinates determination was developed. The proposed methodology is based on the algorithm of distorted vectors removal to achieve the required accuracy of the GNSS network. This methodology was tested on a model GNSS network with 14 points in which all the vectors were measured. As a result of the optimization, 55% of the vectors were removed from the initial scheme of the GNSS network and the optimal positions of the selected points were found to maintain the value of the mean square error of coordinate determination at 2 mm. That is, the use of the proposed methodology has improved the mean square error of coordinates determination and reduced the cost of measuring. It is established that the given methodology can be applied for optimization of GNSS networks with different geometric shapes and measurement schemes. It is known that the removal of vectors leads to a reduction in the time of observation, and as a consequence of a reduction in the cost of work, which is positive, and sometimes a decisive factor. However, removing vectors reduces the number of redundant measurements on the network, which adversely affects the network's hardness, and reliability also varies. Therefore, research in this direction will continue.

Keywords: *optimization, configuration, GNSS network, measurement scheme, determinants of covariance matrix.*

Надійшла до редакції

21.03.2018

УДК 528.48

Ю.В. Медведский, канд. техн. наук., ас. кафедры инженерной геодезии
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВЫСОТНЫХ
СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕМЕТРИЧЕСКИХ
ЦИФРОВЫХ КАМЕР**

В работе рассмотрен подход к решению задачи геодезического мониторинга с использованием системы неметрических камер. Предложена технология выполнения работ, позволяющая определить изменение геометрических параметров сооружения под воздействием внешних факторов и прогнозировать их на заданный момент времени. В основу положен принцип относительных измерений, реализованный через нахождение смещения между парами снимков от неметрических камер. Смещение пары изображений предложено определять с помощью алгоритма фазовой корреляции, который обеспечивает высокую скорость решения и надежность получаемых