

ГЕОДЕЗІЯ

УДК 528.3

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.4-1/24>

Бурак К.О.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти та газу

Лиско Б.О.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти та газу

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОСНИХ КООРДИНАТ ВЕКТОРА З ДОПОМОГОЮ RTN РІШЕНЬ

Метою даної роботи дослідження можливості виконання розмічуваних інженерно-геодезичних робіт RTN методом на суміжних пунктах шляхом несинхронних спостережень (будь-який зручний час з огляду на виробничі умови, навіть протягом 1 2-х діб). Для досягнення вказаної мети були поставлені такі завдання: побудувати математичну модель і дослідити залежність точності процесу побудови векторів (ліній) з допомогою використання RTN рішень GNSS приймачем від технологічних параметрів DOP, особливо тих, зміни яких повторюються в часі; встановити інформативність технологічних параметрів DOP, для можливості прогнозування точності вимірювання, під час виконання розпланувальних та розмічувальних інженерно-геодезичних робіт, за неможливості виконання синхронних спостережень. Методика дослідження точності побудови векторів (ліній) було виконано дослідження на еталонному базисі. Спостереження проводилися в RTN-режимі з приймачем налаштованим на прийом диференційних поправок від мережі System Solutions. Практична значущість встановлено, що завдяки високій точності та можливості продовжувати виконувати роботи через певний час, завдяки повторюваності технологічних параметрів DOP, можна використовувати запропоновану методику побудови векторів (ліній) з допомогою RTN рішень для розпланувальних та розмічувальних робіт на будівельному майданчику. Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в роботі вперше розроблено математичну модель для дослідження впливу технологічних параметрів DOP на точність процесу побудови векторів (ліній) RTN методом в результаті опрацювання даних GNSS вимірів на пунктах еталонного полігону, що розташовується в 10 км зоні від перманентної станції System Solutions.

Ключові слова: GNSS, координати, RTN-вимір, розпланувальні роботи, електронний тахеометр.

Постановка проблеми. Є велика кількість наукових праць, присвячених вимірюванню в RTN режимі, головною метою яких є визначення точності координат точок, та вплив на неї природних та механічних чинників [8; 10; 15-18]. Водночас проблеми пов'язані з точністю побудованих за результатами GNSS вимірів довжин ліній та кутів, які визначають можливість їх використання під час розмічувальних та розпланувальних інженерно-геодезичних роботах не до кінця розв'язані.

У попередніх роботах наші дослідження були спрямовані на: знайдення СКП виміру віддалей $m_{від}$ – і кутів – $m_{кут}$ завдяки впливу взаємного розміщення перманентних станцій, фізико-географічних характеристик району робіт під час виконання вимірів на суміжних точках протягом

1 год. Експериментально встановлено можливість досягнення точності, яка характеризується середньоквадратичними похибками $m_{від} = 2,52 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ для виносу довжин ліній та $2,08'' \pm 0,95''$ для кутів [2; 3]; розроблено та досліджено алгоритм трансформування координат з системи координат генплану в УСК-2000 і навпаки, з мінімізацією впливу випадкових помилок RTN рішень та можливість відбракування грубих похибок в координатах пунктів геодезичної основи, шляхом забезпечення оптимальної співвідносності координат пунктів в двох системах методом ітерацій [4]; розроблено практичні рекомендації для винесення головних осей будівель (осей симетрії) з використання RTN методики GNSS-вимірів та забезпечення додаткового контролю розмічуваль-

них робіт з використанням електронного тахеометра [3].

На основі отриманих результатів запропоновано та обґрунтовано методику використання вимірів в RTN режимі для розпланувальних та розмічувальних робіт. Результати досліджень показали, що точність визначення побудованих векторів (ліній) з допомогою GNSS приймача за різних умов спостережень завжди вища за точність визначення координат цим же приладом.

Через вплив різних чинників і під час розпланувальних робіт виникає низка похибок у координатах точок, які зазвичай групують у такий спосіб: систематичні $\sigma_{\text{сист.}}$, випадкові $\sigma_{\text{вип.}}$. Під час роботи з GNSS приймачем можна виділити ще одна низка похибок, які залежать від супутникового сузір'я з яким працює приймач. Назвемо їх умовні $\sigma_{\text{ум.}}$, характерною особливістю є те, що вони повторюються в часі: кількість супутників, геометричне розміщення та тропосферна затримка $\Delta\rho_k^{\text{trop}}$.

До $\sigma_{\text{сист.}}$ відносять [6; 7; 8; 11], похибки викликані зміщенням годинників супутника і приймача \mathcal{A} , \mathcal{A}_k , іоносферної $\Delta\rho_k^{\text{ion}}$ затримки, орбітальної похибки, яка зумовлена неточними значеннями ефемерид орбіти k-го супутника $\Delta\rho_k^{\text{orb}}$.

До $\sigma_{\text{вип.}}$ відносять [10; 12] похибку обумовлену фазовим шумом приймача та явищем багатопроменевості ε_k^ψ .

Таким чином, точність виміру координат конкретної точки буде залежати від таких похибок:

$$\sigma = \sigma_{\text{сист.}} + \sigma_{\text{вип.}} + \sigma_{\text{ум.}}, \quad (1)$$

Дане припущення (1) є справедливим, якщо RTN вимірювання виконуються на конкретному об'єкті.

На практиці, залежно від поставленого завдання, необхідно визначати такі геометричні параметри, як віддалі та кути. Вони є тензорними величинами, тому вплив систематичних похибок, пов'язаних із трансформуванням координат, іоносферними затримками, похибками зміщення годинників супутника і приймача буде суттєво зменшений завдяки компенсації їхньої систематичної складової [5].

Випадкові похибки ми не можемо спрогнозувати, оскільки явище багатопроменевості повністю залежить від навколишнього середовища, яке є індивідуальним для конкретного об'єкта чи навіть його ділянки, а фазовий шум приймача буде залежати не тільки від марки та моделі приймача але й від партії.

Наші дослідження виконувалися на конкретному базисі, а вимірювання проводились одним і тим же приймачем, тому зупинимось на дослі-

дженні впливу геометрії розташування навігаційних супутників на точність побудови векторів (ліній) з допомогою RTN методу, яка під час виконання несинхронних вимірів на суміжних точках буде мати переважний вплив на точність результатів. За вихідну досліджувану мережу було прийнято System Solutions.

Як відомо, точність визначення псевдовіддалей до супутників враховує кожен з чотирьох компонентів позиції, що вимірюється приймачем (x, y, z та t). Якщо видимі навігаційні супутники розташовуються близько один до одного в небі, геометрія є поганою і значення DOP є великим; якщо ж вони далеко один від одного, геометрія є хорошою і значення DOP малим. У нашому випадку DOP задається як набір окремих компонент:

- HDOP (Horizontal Dilution of Precision) – горизонтальна складова частина точності;
- VDOP (Vertical Dilution of Precision) – точність за вертикаллю;
- PDOP (Position Dilution of Precision) – точність позиції в тривимірному просторі (3D);
- TDOP (Time Dilution of Precision) – точність часу;
- GDOP (Geometric Dilution of Precision) – сумарна геометрична точність в тривимірному просторі (3D) та часі.

Між даними технологічними параметрами є строгий зв'язок, який описується наступними формулами:

$$\begin{aligned} \text{PDOP}^2 &= \text{HDOP}^2 + \text{VDOP}^2, \\ \text{GDOP}^2 &= \text{PDOP}^2 + \text{TDOP}^2, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{GDOP}^2 = \text{HDOP}^2 + \text{VDOP}^2 + \text{TDOP}^2,$$

Під час виконання розпланувальних робіт у конкретних виробничих умовах не завжди є можливість виконати виміри на сусідніх точках в час обмежений до години двох, навіть більше часто виробничі умови призводять до того, що виміри розтягуються навіть на декілька днів.

Технологічні параметри DOP повторюються для даного конкретного об'єкта, щодобово та їх можна передбачити, наприклад з використанням інтернет-ресерсу GNSS Planing [14], крім того більш детальну інформацію про точність вимірів можна одержати із RINEX-файлу, наприклад RW5 для програмного забезпечення SurvCe. Виконані дослідження були спрямовані на перевірку гіпотези, що різночасові виміри, виконані за однакових параметрів DOP, дають змогу досягти оптимальної точності вимірювань. Отже мета даної роботи: дослідження можливості виконання розпланувальних та розмічувальних інженерно-геодезичних робіт RTN методом на суміжних пунктах

шляхом несинхронних спостережень у зручний, з огляду на виробничі умови та можливості, час.

Методика планування експериментальних досліджень. Для визначення інформативності впливу технологічних параметрів DOP на процес побудови векторів (ліній) з допомогою RTN рішень провели експериментальні дослідження на території будівельного майданчика, де був закладений еталонний базис (який розташовується в 10 км зоні від перманентної станції System Solutions).

Точні координати пунктів та геометричні параметри досліджуваного базису визначалися з допомогою двох частотного GNSS приймача QStar 8+ (була проведена серія статичних вимірювань упродовж 16 годин) та електронного тахеометра South NTS-350. Детальний опис ділянки наведений в роботі [4]. Еталонна віддаль становила 114,8575 м, її визначено двохсекундним тахеометром, яким було проведено три серії вимірів по 12 вимірювань в прямому та оберненому напрямках, із СКП 0,27 мм обчисленою за формулою Бесселя.

RTN вимірювання проводилися з інтервалом тридцять хвилин, впродовж чотирьох годин, тобто виконано 9 вимірів, кількість усереднень у кожному складала 30 усереднень. Для можливості прогнозування даний дослід був повторений на наступний день у такий самий час. Значення довжини базису із RTN спостережень знаходили за формулою

$$S_{RTN} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}, \quad (3)$$

В табл. 1 наведено порівняння результатів досліджень точності побудови векторів (ліній) з допомогою RTN рішень із їх технологічними параметрами:

- Δ , м – похибка побудови векторів (ліній) з допомогою RTN рішень, визначена як різниця довжин ліній RTN виміру та значення;
- HRMS – горизонтальна середня квадратична похибка;
- VRMS – вертикальна середня квадратична похибка;
- N – кількість супутників, що спостерігається GNSS приймачем на момент вимірювання.

У зв'язку з об'ємністю вихідного файлу «RW5», який може використовуватися для контролю, у табл. 1 наведено усередненні значення похибок вимірювань стовпчик 2 та технологічних параметрів стовпчики 3-8.

Аналіз даних таблиці 1 показує, що технологічні параметри під час експерименту змінювались, наприклад HRMS в діапазоні 7-40 мм, а похибка побудови вектора з одноразових вимірів – від 1 до 26 мм.

Для досліджень впливу технологічних параметрів на точність побудови векторів (ліній), розраховували за даними проведеного дослідження коефіцієнти рівняння регресії $\Delta = f(\text{HDOP}, \text{VDOP}, \text{TDOP}, \text{HRMS}, \text{VRMS}, N)$ напорівняно коротких віддаль (до 200 м).

Обчислили кореляційну матрицю (див. табл. 2). Маємо 6 досліджуваних величин HDOP, VDOP,

Таблиця 1

Результати дослідження точності розмічувальних робіт в RTN режимі

день	t, хв	Δ , м	HRMS	VRMS	HDOP	VDOP	TDOP	N
1	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0,0014	0,009	0,013	0,6782	1,1414	0,7713	16
	30	0,0047	0,011	0,017	0,6711	1,0604	0,7168	16
	60	-0,0032	0,009	0,014	0,6699	0,984	0,6265	16
	90	0,0047	0,009	0,014	0,8688	1,4848	0,9568	14
	120	-0,0009	0,007	0,01	0,8163	1,3119	0,9675	14
	150	0,0025	0,008	0,011	0,7467	1,196	0,7999	14
	180	0,0246	0,04	0,049	0,8336	1,1416	0,7643	14
	210	-0,0180	0,036	0,039	0,9323	1,1314	0,7974	13
240	-0,0265	0,049	0,05	1,2015	1,287	0,9569	12	
2	0	0,0026	0,007	0,01	0,6836	1,0731	0,6859	15
	30	-0,0032	0,013	0,017	0,704	1,194	0,801	14
	60	-0,0014	0,010	0,015	0,661	1,115	0,753	16
	90	0,0023	0,0012	0,016	0,749	1,137	0,824	15
	120	-0,0021	0,015	0,019	0,842	1,399	0,873	15
	150	0,0052	0,029	0,042	0,816	1,312	0,968	14
	180	0,0168	0,042	0,042	0,919	1,116	0,784	12
	210	0,0216	0,03	0,033	0,801	1,132	0,739	13
	240	0,01787	0,037	0,038	0,918	1,109	0,779	12

TDOP, HRMS, VRMS, N, представлених вибірками по 299 значень $X_i = \{x_{i1}, x_{i2} \dots x_{i299}\}$. Завдяки симетричності коваріації (властивість $r_{ij} = r_{ji}$), то кореляційна матриця симетрична щодо головної діагоналі та оцінку слід проводити лише для елементів, що розташовуються над або під діагоналлю.

Далі провели перевірку коефіцієнтів на значущість – $r_k^{a,f}$ [9]. Знову ж таки, через симетричність матриці, це було зроблено лише для половини елементів. Оскільки для кожної вибірки було отримано по 299 значень, ступінь свободи становить $f=299-2$. З огляду на те, що $\alpha=0,05$ значення $t_{\alpha/2}^f = t_{0,025}^{297} = 2,398$ однакове для всіх елементів матриці. Далі підставили одержане значення в рівняння (4) на місце емпіричного значення t-статистики та розв'язали отримане рівняння

$$r_k^{a,f} = \frac{t_{\alpha/2}^f}{\sqrt{n-2+(t_{\alpha/2}^f)^2}} = 0,447, \quad (4)$$

Всі значення в кореляційній таблиці, які за модулем менші 0,447 можна вважати статистично не значущими та під час створення математичної моделі дані технологічні параметри не слід враховувати.

Згідно з одержаними результатами можна стверджувати, що такі технологічні параметри, як: VDOP, TDOP не можуть відобразити точність процесу побудови векторів (ліній) з допомогою RTN рішень. Також варто звернути увагу на значення HRMS і VRMS, окрім того, що вони сильно впливають на точність, між даними технологічними параметрами є пряма і сильна кореляція (0,988727). Після проведення тесту Дарбіна-Уотсона [12] на залишки було знайдено автокореляцію між даними параметрами. Це дало нам можливість під час розрахунку коефіцієнтів рівнянь регресії не враховувати один із даних технологічних параметрів (VRMS).

Розрахували коефіцієнти рівнянь регресії, тобто залежності точності побудови векторів

(ліній) з допомогою RTN рішень від значущих технологічних параметрів $\Delta = f(\text{HDOP, HRMS, N})$.

Регресійний аналіз проводився на основі технологічних параметрів і дозволив визначити внесок кожної незалежної змінної у варіацію досліджуваної (прогнозованої) залежної змінної величини.

Основним завданням регресійного аналізу є визначення впливу чинників (технологічних параметрів) на результативний показник (в абсолютних показниках). Передусім для цього необхідно підібрати та обґрунтувати рівняння зв'язку, що відповідає характеру аналітичної стохастичної залежності між досліджуваними ознаками. Рівняння регресії показує, як в середньому змінюється результативна ознака (Yх точність винесення векторів (ліній)) під впливом зміни факторних ознак (HDOP, HRMS, N).

У загальному вигляді рівняння регресії можна представити так $Y_x = f(\text{HDOP, HRMS, N})$.

Для побудови адекватної моделі детально проаналізуємо значущі технологічні параметри.

На жаль у жодних доступних літературних джерелах немає детальної інформації про те як розраховується HRMS за RTN вимірювання. Однак безпосередньо у кодї програмного забезпечення, яке встановлено на контролері GNSS приймача даний параметр знаходять як:

$$\text{HRMS} = 2 * \text{Math.sqrt}((\text{Math.pow}(\text{LatErr}, 2) + \text{Math.pow}(\text{LonErr}, 2)));$$

Звідси можна стверджувати, що формула для обчислення HRMS матиме вигляд:

$$\text{HRMS} = 2 * \sqrt{(\text{ERR}_{\text{LAT}}^2 + \text{ERR}_{\text{LON}}^2)}, \quad (5)$$

де: ERR_{LAT} та ERR_{LON} помилка визначення широти (Latitude Error) та довготи (Longitude Error).

Водночас в дисертаційній роботі канадського вченого Lukasz Kosma Bonenberg [19] описується зв'язок горизонтальної похибки із параметрами: віддаль до базової станції (BL), кількість супутників (SV) і горизонтальна точність позиціонування (HDOP)

Таблиця 2

Кореляційна матриця залежності впливу технологічних параметрів на точність побудови векторів (ліній) з допомогою RTN рішень

	Y	HDOP	VDOP	TDOP	HRMS	VRMS	N
Y	1						
HDOP	0,604379	1					
VDOP	0,090497	0,547606	1				
TDOP	0,195958	0,704374	0,922904	1			
HRMS	0,813193	0,75444	0,081818	0,236125	1		
VRMS	0,806538	0,692072	0,071648	0,202695	0,988727	1	
N	-0,56237	-0,80316	-0,46754	-0,58917	-0,62677	-0,58975	1

$$HRMS = 27.117 + 0.163 \times BL - 1.897 \times OD - 1.604 \times SV_s + 0.972 \times HDOP, \quad (6)$$

Однак, автор наводить дану формулу для RTK методу. Оскільки наші дослідження проводилися з використанням двочастотного приймача у мережі постійно діючих референтних станцій для нас вона може бути тільки приблизною.

Побудова моделей множинної регресії включає в себе такі етапи:

- 1) вибір форми зв'язку (рівняння регресії);
- 2) відбір факторних ознак;
- 3) забезпечення достатнього обсягу сукупності.

Визначення типу рівняння складне тим, що для будь-якої форми залежності можна вибрати цілу низку рівнянь, які певною мірою будуть описувати ці зв'язки. Особливе значення мають лінійні моделі через простоту і логічність їхньої фізичної інтерпретації.

Під впливом технологічного параметру N (кількість супутників) результативна ознака змінюється нерівномірно, причому з сповільненням, що зобов'язує нас використовувати для даного параметру рівняння гіперболи у регресійному аналізі, про що свідчить рис. 1. В загальному зі збільшенням кількості супутників точність зростає.

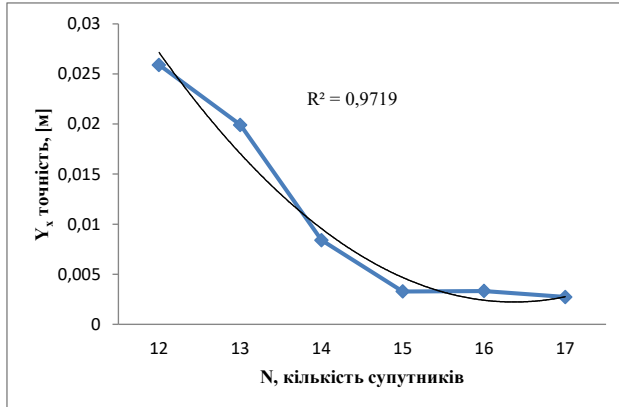


Рис. 1. Залежність точності побудови векторів (ліній) з допомогою RTN рішень від кількості супутників

Оскільки зі зміною факторної ознаки результативна змінюється нерівномірно, то розглянемо багатфакторне рівняння множинної регресії за нелінійної залежності:

$$Y_x = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_4 + a_3 \frac{1}{X_6} + a_4 X_1 X_4 + a_5 X_1 \frac{1}{X_6} + a_6 X_4 \frac{1}{X_6} + a_7 X_1 X_4 \frac{1}{X_6} + a_8 X_1^2 + a_9 X_4^2 + a_{10} \frac{1}{X_6^2}, \quad (7)$$

де, X_1, X_4, X_6 – технологічні параметри HDOP, HRMS, N відповідно.

Проблема відбору факторних ознак для побудови моделей взаємозв'язку може бути вирішена на основі інтуїтивно-логічних або багатовимірних математико-статистичних методів аналізу.

Нами був обраний спосіб відбору факторних ознак з допомогою крокової регресії (кроковий регресійний аналіз). Таким чином, ми згідно з алгоритмами послідовного включення, вводили або виводили чинники в рівняння регресії з наступною перевіркою їх статистичної значущості.

Під час використання даного алгоритму «включення», чинники по чергово вводяться в рівняння регресії так званим прямим методом. Під час перевірки значущості введеного чинника визначається, наскільки зменшується сума квадратів залишків і збільшується величина множинного коефіцієнта кореляції.

Сутність алгоритму послідовного виключення полягає в тому, що відкидаються чинники, що стали незначимими за t-критерієм Стюдента або іншими статистичними критеріями. Чинник є незначимим, якщо його включення в рівняння регресії тільки змінює значення коефіцієнтів регресії, не зменшуючи її суми квадратів залишків і не збільшуючи їх значення.

Якщо за включення в модель відповідної факторної ознаки величина множинного коефіцієнта кореляції збільшується, а значення коефіцієнта регресії не змінюється (або змінюється несуттєво), то дана ознака суттєва і її включення в рівняння регресії доцільне. В іншому випадку чинник недоцільно включати в модель регресії.

Результати. На підставі проведених розрахунків було побудовано математичну модель і досліджено залежність технологічних параметрів для процесу побудови векторів (ліній) з допомогою використання RTN рішень GNSS приймача налаштованого на прийом диференційних поправок від мережі System Solutions

$$Y_x = 7,8442 \cdot \frac{HRMS}{N} - 0,0013 \cdot HDOP, \quad (8)$$

Невідомі коефіцієнти рівняння регресії визначили методом найменших квадратів у кодованому вигляді. Оцінку значущості коефіцієнтів рівняння регресії перевірили при рівні 0,05 з допомогою t-критерію Стюдента. Статистично незначимі коефіцієнти були відкинуті. Після цього значущі коефіцієнти рівнянь регресії другого порядку були підставлені у формулу (8).

В табл. 3 наведена перевірка адекватності отриманої математичної моделі процесу побудови векторів (ліній) з допомогою RTN рішень.

Таблиця 3

Регресійна статистика досліджуваної моделі

Множинний R	0,893567
R-квадрат	0,798461
Нормований R-квадрат	0,794416
Стандартна похибка	0,0071
Кількість вимірів	299

Аналіз отриманого рівняння регресії та побудованих поверхонь відгуку (табл. 4), свідчать, що величини параметрів оптимізації (HDOP, HRMS, та кількості супутників) суттєво впливають на процес побудови векторів (ліній) з допомогою RTN рішень GNSS приймачем.

Для дослідження впливу технологічних параметрів на точність побудови векторів (ліній) побудували поверхні відгуку залежно від двох змінних чинників (інші чинники перебували на постій-

ному основному рівні), використавши вільне програмне забезпечення GNU Octave (рис. 2).

За результатами аналізу графічних залежностей:

– з рис. 2а бачимо що зі зростанням параметра HRMS, зменшення кількості супутників та сталій величині параметра HDOP точність побудови векторів (ліній) зменшується;

– з рис. 2б можна судити про те, що із збільшенням параметра HDOP та кількості супутників, за сталої величини параметра HRMS точність зростає;

– з рис. 2в можна судити про те, що із збільшенням параметра HRMS та сталій кількості супутників точність зменшується. Параметр HDOP за такої комбінації технологічних параметрів практично не впливає на точність визначення віддалей.

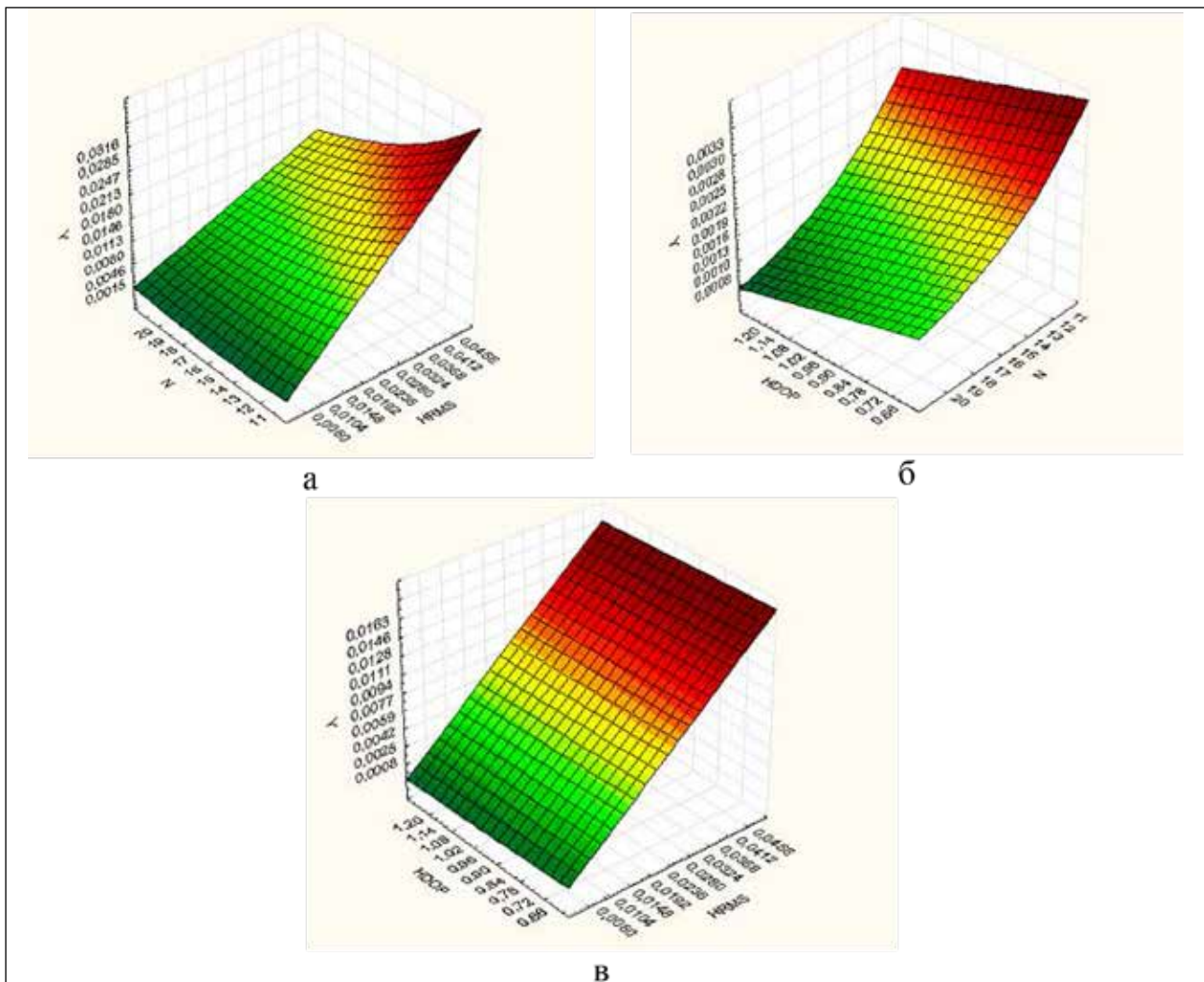


Рис. 2. Поверхні відгуку залежності точності побудови векторів (ліній) GNSS приймачем від технологічних параметрів процесу RTN вимірювань: а – N, HRMS, HDOP = 0,66; б – HDOP, N, HRMS = 0,006; в – HDOP, HRMS, N = 18

Дисперсійний аналіз отриманих коефіцієнтів

	Стандартна похибка	t-статистика	P-Значення	Нижнє 95%	Верхнє 95%
a_0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
HDOP	0,335689	23,36758	2,98E-69	7,183606	8,504866
HRMS/N	0,000598	-2,21776	0,027328	-0,0025	-0,00015

Результати другого дослідження точності розмічувальних робіт в RTN режимі

t, хв	Постанні вимірювання				Синхронні вимірювання			
	Δ , мм	HRMS	HDOP	N	Δ , мм	HRMS	HDOP	N
0	1,8	0,009	0,79	15	1,8	0,009	0,79	15
15	2,7	0,007	0,81	14	3,9	0,007	0,81	14
30	4,9	0,012	1,08	9	6,0	0,012	1,08	9
45	9,1	0,012	1,17	10	8,3	0,012	1,17	10
60	3,0	0,007	0,93	13	0,7	0,007	0,93	13
75	1,6	0,007	0,95	13	0,9	0,007	0,95	13
90	1,4	0,008	1,03	11	1,0	0,008	1,03	11
105	5,5	0,010	0,87	12	4,9	0,010	0,87	12
120	0,9	0,007	0,82	13	1,6	0,007	0,82	13
135	4,7	0,007	0,87	12	0,3	0,007	0,87	12
150	2,6	0,009	0,88	12	2,6	0,009	0,88	12
165	1,0	0,007	0,78	14	3,5	0,007	0,78	14
180	0,0	0,007	0,83	13	6,2	0,007	0,83	13
195	2,7	0,009	0,78	13	9,6	0,009	0,78	13
210	0,7	0,010	0,75	14	0,5	0,010	0,75	14
225	2,3	0,008	0,75	14	1,2	0,008	0,75	14
240	4,3	0,010	0,72	15	4,0	0,010	0,72	15
255	3,6	0,009	0,75	14	5,9	0,009	0,75	14
270	0,3	0,007	0,81	13	4,3	0,007	0,81	13
285	5,6	0,008	0,83	13	0,3	0,008	0,83	13
300	10,0	0,008	1,28	10	0,8	0,008	1,28	10
315	9,8	0,009	1,29	10	9,6	0,009	1,29	10
330	9,1	0,008	1,06	11	5,6	0,008	1,06	11
345	2,1	0,010	0,99	12	9,0	0,010	0,99	12
	3,7	0,009	0,9	13	3,9	0,009	0,9	13

За ступенем впливу технологічних параметрів на точність побудови проектних векторів (ліній) можна розмістити їх в такому порядку: HRMS, N і HDOP.

Аналіз отриманого рівнянь регресії (8) та побудованих поверхонь відгуку (рис. 2) свідчить, що величина параметрів оптимізації для процесу побудови векторів (ліній) з допомогою RTN рішень найбільш значний вплив мають такі технологічні параметри, як HRMS та кількості супутників. Оскільки вплив параметра HDOP на остаточну точність побудови проектних віддалей є значним, однак із виключенням його із регресійного обчислення моделі точність знижується не більш ніж на 2,3%, що, зі свого боку, не перевищує 95% рівень

надійності, то для спрощення обчислень без значної втрати точності можна використовувати формулу вигляду:

$$Y_x = 7,2002 \cdot \frac{HRMS}{N}, \quad (9)$$

Формула (9) відображає регресійний зв'язок між технологічними параметрами (HRMS кількістю супутників) та точністю побудови проектних векторів (ліній) з допомогою RTN вимірювань.

З метою підтвердження одержаних результатів та регресійної моделі, нами було повторено експеримент у червні 2019 року на тому ж базисі однак іншим GNSS приймачем фірми Topcon. Особливістю даного дослідження є те, що окрім вимірів проведених через встановлений проміжок часу виконувались і синхронні. У результаті проведених

досліджень одержані результати, які наведено в табл. 5.

Дані наведені у табл. 5 підтверджують тісний зв'язок між точністю побудови проектних векторів ліній та технологічними параметрами. В даному експерименті технологічні параметри наприклад HRMS змінювалися в меншому діапазоні в порівнянні із попереднім 7-10 мм, що відповідно відобразилося на точності побудови вектора з RTN вимірів – від 1 до 10 мм. В результаті проведених досліджень було одержано 720 значень віддалі із відповідними технологічними параметрами. Дану вибірку було об'єднано із попередньою, яка складалася з 299 значень, та повторно розраховано рівняння регресії залежності точності побудови векторів (ліній) GNSS приймачем від технологічних параметрів процесу RTN вимірювань

$$Y_x = 7,5706 * \frac{HRMS}{N} - 0,0012 * HDOP, \quad (10)$$

Після проведення дослідження одержаних рівнянь регресії (8) та (10) було встановлено, що максимальне відхилення даних функцій за критичних значень не перевищує 10%, у той час середнє відхилення складає 2,6%. Одержані значення свідчать про високу достовірність одержаних результатів, бо середні відхилення не перевищують рівень надійності регресійного аналізу.

Також було проведено аналіз впливу часу на точність одержаних результатів для цього було виконано кореляційний аналіз між одержаною точністю побудови проектних векторів (ліній) та проміжком часу який пройшов від першого вимірювання на першій точці та поточним часом. В результаті проведеного випробування кореляція

між розглянутими параметрами склала 0,2753, що говорить незначний впливу даного чинника на точність. Даний результат також підтверджується тим, що точність одержана із синхронних вимірів (3,9 мм) та вимірів проведених через різний проміжок часу (3,7 мм) є рівною.

Висновки. Отже, з результатів досліджень зроблено такі висновки:

1. точність побудови векторів (ліній) з допомогою RTN рішень в мережі System Solution під час проведення експерименту коливалася в межах 1,4 26,5 мм залежно від технологічних параметрів, що дозволило розробити рекомендації щодо проведення спостережень;

2. розпланувальні та розмічувальні інженерно-геодезичні роботи можна виконувати упродовж декількох днів, однак необхідно витримувати подібні технологічні параметри, які просто прогнозуються з допомогою спеціалізованих інтернет-ресурсів, (наприклад, в вільному доступі GNSS Planing) і запропонованої математичної моделі, що дає змогу прогнозувати точність виконання даних робіт. Проте кінцевий висновок про точність вимірів можна робити тільки за результатами вимірів, аналізуючи параметр HRMS і внутрішню сходимість результатів;

3. встановлено, що для забезпечення необхідної точності (3 5 мм) побудови проектних векторів слід дотримуватися таких рекомендацій: кількість супутників ≥ 15 , HRMS $\leq 0,009$, GNSS приймач повинен бути налаштований хоча б на 25 усереднень (наведені методичні рекомендації справедливі для часткового випадку, коли розмічувальні роботи виконуються в 10 км зоні від перманентної станції).

Список літератури:

1. Баран П.І. Інженерна геодезія. Київ : в-во ВІПОЛ, 2012. 618 с.
2. Бурак К.О., Лиско Б.О. Exploring the accuracy of lengths constructions when solving the engineering geodesy issues with RTN method. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. 2017. № 85. С. 5–12.
3. Бурак К.О., Лиско Б.О. The possible uses of RTN solutions for markup works on construction. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. 2018. № 87. С. 18–23.
4. Бурак К.О., Лиско Б.О. Implementation of alternative algorithms for defining the transformation parameters of USK-2000 and coordinate systems of general layout during the marking operations. *Archives of Institute of Civil Engineering*. 2018. № 87. С. 49–60.
5. Дослідження точності визначення координат GNSS методом в режимі RTK / А.Й.Віват, В.О. Літинський, та ін. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2011. № 74. С. 52–59.
6. Заблоцький Ф., Савчук М. Точність вологої складової зенітної тропосферної затримки, виведеної із GPS-спостережень. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2014. Вип. I (27). С. 52–54.
7. Задемленюк А.В. Дослідження впливу похибок на супутникові вимірювання в RTK-режимі. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2010. № 73. С. 25–33.
8. Задемленюк А.В. Результати експериментальних досліджень точності визначення координат та практичне застосування RTK-технології з використанням GPRS Internet з'єднання. *Геодезія, архітектура та будівництво*. Львів, 2009. Вип. 2. С. 130–133.

9. Літнарівич Р. М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу. Рівне : МЕРУ, 2011. 140 с.
10. Терещук О. І. Методика та результати дослідження кінематичних визначень координат різними GNSS-приймачами. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2014. № 80. С. 48–61.
11. Янків-Вітковська Л.М., Задемленюк А.В. Дослідження азимутально-часових варіацій стану іоносфери за спостереженнями з мережі GNSS-станцій. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2014. № 80. С. 40–47.
12. Tale of two RTNs : Rigorous evaluation of real-time network GNSS observations / Allahyari M., Olsen M., et al., eds. *Journal of Surveying Engineering*. 2018. 144. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000249.
13. Gujarati D.N., Porter D.C. *Basic Econometrics* (5th ed.). Boston : McGraw-Hill Irwin, 2009.
14. GNSS Mission Planning. URL: <http://gnssmissionplanning.com/App/Settings/> (дата звернення 15.09.2018).
15. Kizil U., Tisor L. Evaluation of RTK-GPS and Total Station for applications in land surveying. *Journal of Earth System Science*. 2011. № 120. С. 215–221.
16. Mullenix D., Fulton J., Brooke A. RTK Networks : Single Baseline and Network Solution Options. *Timely information Agriculture, Natural Resources & Forestry*. 2011. С. 1–2.
17. Analysis of the TXDOT RTN and OPUS-RS from the geoid slope validation survey of 2011 : Case study for Texas / D. Smith, K. Choi, D. Prouty, et al., eds. *Journal of Surveying Engineering*. – 2014. 140. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000136, 05014003.
18. Weaver B., Gillins D., Dennis M. Hybrid Survey Networks : Combining Real-Time and Static GNSS Observations for Optimizing Height Modernization. *Journal of Surveying Engineering*. 2018. 144 (1). DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000244.
19. Bonenberg L.K. Closely-coupled integration of Locata and GPS for engineering applications : PhD thesis. University of Nottingham, 2014. 184 p.

Burak K.O., Lysko B.O. INVESTIGATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETER EFFECT ON DETERMINING ACCURACY OF VECTOR RELATIVE COORDINATE BY RTN SOLUTIONS

The aim of this work is to study the possibility to conduct the marking engineering-geodesic works by the RTN method on the abutting sites with asynchronous observations during unlimited (depending on the work conditions, may be even 1-2 days) time. In order to achieve this aim, the following tasks have been set: to develop a mathematical model and study the accuracy dependency of vector development with RTN solutions by GNSS receiver from DOP parameters, especially with recurring changes; to set the informative value of DOP technological parameters in order to predict the measurements accuracy during the planning and marking engineering-geodesic works when the synchronous observation is not possible. The research was made on the etalon basis to study the accuracy of vectors (lines) development. The study was made in the RTN mode with the receiver set to detect the differential adjustments from System Solutions network. Practical value: It was found that it is possible to develop vectors by using the RTN solutions for planning and marking works on the construction site due to the high accuracy, possibility to continue works over some period of time because of the DOP technological parameters recurrence. Scientific novelty of the obtained results covers developing a mathematical model and studying the influence of DOP technological parameters on the accuracy of the process of vector (line) development by the RTN method as the result of GNSS measurement processing on the points of the etalon site, located in 10 km zone from the System Solutions permanent station.

Key words: GNSS, coordinates, RTN measurement, planning works, total station.