ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕВПОРЯДКУВАННЯ

УДК 528.48

Черняга П.Г., д.т.н., професор, Янчук О.Є., аспірант, Трохимець С.М., асистент, Бочик Р.Я., ст. 5 курсу ФЗГ (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ВПЛИВ ОБМЕЖЕНОЇ ВИДИМОСТІ ГОРИЗОНТУ НА ТОЧНІСТЬ GPS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПРИ ТРИВАЛОСТІ СЕСІЇ СПОСТЕРЕЖЕННЯ МЕНШЕ 10 ХВИЛИН

Досліджено можливість використання GPS-спостережень для земельно-кадастрової інвентаризації земель населених пунктів в умовах обмеженої видимості горизонту. Обчислення виконано при тривалостях сесій спостереження 2, 5 та 10 хвилин, довжинах базових ліній 1, 4 та 7 км для 100 варіантів розташування перешкод навколо приймача.

Possibility of the use of GPS-observations for settlement land cadastre inventories under the conditions of limited horizon visibility is investigated. A calculation is executed at period of satellite observations 2, 5 and 10 minutes, lengths of baseline vector 1, 4 and 7 km for 100 variants of obstacles location around the receiver.

Для вирішення різноманітних господарських та інженерних завдань необхідне визначення координат точок на земній поверхні. Відповідно до розвитку людського суспільства зростають і обсяги та складність поставлених завдань. В зв’язку з цим вдосконалюються й засоби виконання вимірювань. У нинішній час геодезичні методи вимірювань й технології їхнього застосування для розв'язку завдань науки й техніки зазнають революційних змін. Це пов’язано передусім із глибокою автоматизацією як процесу вимірювань, так і подальшої обробки результатів. Яскраво це проявляється у супутникових методах визначення місцеположення, які за продуктивністю у сотні разів перевершують класичні і не поступаються їм за точністю [1, 4, 5].

Найбільшим поштовхом до цього стало створення супутникових радіонавігаційних систем типу GPS NAVSTAR (США), ГЛОНАСС (Росія), Galileo (Європейське Співтовариство) та COMPASS (Китай). Широке впровадження GPS-технологій у геодезичні вимірювання вимагає й використання їх для спостережень у міських умовах. Однак, при щільній міській забудові значно зменшується частина небосхилу не закрита перешкодами і відповідно суттєво обмежується кількість видимих супутників. Враховуючи, що для обчислення просторових координат пункту необхідна видимість як мінімум на 4 супутники, та явно погіршену в умовах обмеженої видимості геометрію сузір’я

супутників стає зрозумілим складність виконання спостережень в таких умовах.

У праці Тревого І. та Костецької Я. [6] описано результати досліджень проведених на Жовківському та Яворівському взірцевих базисах. Перший базис розташований на відкритій місцевості, а другий – знаходиться у промзоні. Його траса проходить вздовж одноповерхових складських приміщень, на відстані 3-4 м і практично закрита рослинністю. Вимірювання виконувались з використанням статичної та швидкої статичної методик з тривалістю сесій спостережень до 1 год. та реєстрацією сигналів через 30 сек. Оцінка точності виконана за відхиленнями між еталонними та виміряними довжинами ліній. На відкритому (Жовківському) базисі абсолютні похибки не перевищують 4 мм, при СКП порядку 2 мм. На базисі з перешкодами (Яворівському) проведено два цикли спостережень – ранньою весною (коли відсутнє листя) та влітку. Вони характеризуються середньоквадратичними похибками 2,8 та 6,4 мм відповідно. Тобто, проходження сигналу через крони дерев з листям у кілька разів знизило точність вимірювань. Тоді, як часткове обмеження поля зору приймачів (одноповерховими будівлями на відстані 3-4 м від приймача) мало вплинуло на точність.

У наших дослідженнях [7] виконано аналіз точності спостережень при розташуванні приймачів у різних ситуаціях, а саме: базовий приймач знаходиться на відкритій території, а роверний – на території із закритою видимістю почергово на північ, південь, схід та захід. Обробка спостережень виконувалась при моделюванні кута відсічки на роверному приймачі 0º, 5º, 15º, 30º, 45º для базової лінії довжиною 1 км. Обробка виконувалась за годинними та 30-ти хвилинними інтервалами супутникових спостережень. Отримані результати свідчать, що навіть в умовах обмеженої видимості небосхилу, недоцільно використовувати сигнали з супутників розташованих на низьких кутах підвищення (0º та 5º). Крім того, відмічено принципову можливість використання супутникових спостережень на територіях з обмеженою видимістю горизонту для визначення просторового місцеположення з точністю 1-3 см.

Метою даної роботи є оцінити можливість виконання GPS-спостережень в умовах обмеженої видимості горизонту та дослідити точність таких визначень при тривалості сесії спостереження до 10 хвилин. Ключовим фактором, який досліджується, є обмеження видимості небосхилу, що призводить до зменшення кількості видимих супутників. В роботі не враховувались інші похибки, що посилюються в умовах забудованої території, які за рахунок вдалого вибору методики спостережень та інструментальних вдосконалень можуть певною мірою компенсуватися.

У наших попередніх дослідженнях проаналізовано точність визначення місцеположення при різних варіантах розташування роверного приймача всередині території квадратної форми, оточеній за периметром будівлею 30-метрової висоти. Обчислення виконано у 25-ти варіантах розташування

приймача всередині згаданої території (в подальшому – забудованого квадрата), при розмірах сторін – 100, 80, 60 та 40 м. Схематичне зображення змодельованої перешкоди та варіанти розташування роверного приймача показано на рисунку.

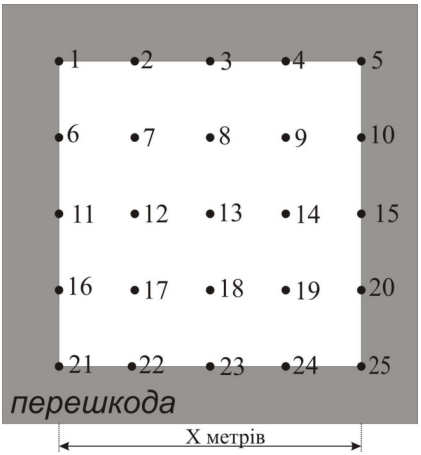

Рисунок. Змодельована перешкода та варіанти розташування роверного приймача всередині території забудованого квадрата

Для дослідження використано файли добових спостережень (отримані з web-сторінки SOPAC) від 30 січня 2009 року на 4 перманентні станції (*P691*, *P695*, *P696*, *P699*) розташованих на широті 46º. Спостереження на них виконується двочастотними приймачами з дискретністю 15 секунд та кутом відсічки 0º. З цієї ж web-сторінки взяті геоцентричні координати згаданих станцій на епоху 2009,0726. За координатами обчислено довжини векторів P695-P696=1081,9742 м, P699-P696=4116,6223 м, P691-P696=6983,9621 м та прирости координат між ними, які в подальшому використовувались як еталонні для порівняння зі значеннями обчисленими в результаті дослідження. За відхиленнями обчислених та еталонних значень обраховувалися середньоквадратичні похибки визначення приростів координат $m_{\Delta X}$, $m_{\Delta Y}$, $m_{\Delta Z}$ [3]:

$$m = \sqrt{\frac{[\upsilon_i \upsilon_i]}{n-1}}\ , \qquad (1)$$

де m – середньоквадратична похибка визначення приростів координат за певною віссю;

υ_i – відхилення обчислених величин приростів від еталонних значень.

Середньоквадратичні похибки $m_{прост}$ просторового положення кінцевої точки базової лінії відносно початкової обчислено за формулою:

$$m_{прост} = \sqrt{m_{\Delta X}^2 + m_{\Delta Y}^2 + m_{\Delta Z}^2}\ , \qquad (2)$$

де $m_{\Delta X}$, $m_{\Delta Y}$, $m_{\Delta Z}$ – середньоквадратичні похибки приростів координат відповідно за осями X, Y, Z.

Для обчислення точності планових та висотних визначень геоцентричні координати перманентних станцій та вершин базових ліній обчислені в процесі дослідження було перетворено в систему координат Гаусса-Крюгера за допомогою програми Photomod GeoCalculator, яка вільно доступна в мережі Internet.

Для перевірки точності отриманих рішень виконано порівняння розв'язків приростів за осями x, y, H з еталонними значеннями. На його основі обчислено середньоквадратичні похибки визначення приростів координат $m_{\Delta x}$, $m_{\Delta y}$, $m_{\Delta H}$ за формулою (1). Середньоквадратичні похибки $m_{план}$ планового положення кінцевої точки базової лінії відносно початкової обчислено за формулою:

$$m_{план} = \sqrt{m_{\Delta x}^2 + m_{\Delta y}^2}\ , \qquad (3)$$

де $m_{\Delta x}$, $m_{\Delta y}$ – середньоквадратичні похибки приростів координат, відповідно за осями x та y.

Опрацювання результатів спостережень проводилось з використанням програмного забезпечення Trimble Geomatics Office. При опрацюванні базових ліній використовувались наступні параметри: модель тропосфери – Хопфілд; модель іоносфери – стандартна; ефемериди – бортові (передані); тип даних – кодові та фазові; тривалість сесії спостереження – 2, 5 та 10 хвилин, які обиралися рівномірно впродовж доби через кожну годину. Таким чином, з врахуванням того, що дослідження виконувались для 25-ти точок при 4 розмірах сторін квадрата та трьох варіантах довжин базових ліній, було опрацьовано понад 20000 сесій спостережень.

На першому етапі визначався відсоток успішно опрацьованих базових ліній. Для перевірки надійності визначення базової лінії використовувались стандартні характеристики оцінки точності, а саме [2]: відношення (ratio), коефіцієнт дисперсії (reference variance) та середньоквадратична похибка СКП (Root Mean Square). Рішення вважалось успішним, якщо базова лінія була опрацьована і стандартні характеристики оцінки точності знаходились в наступних межах: відношення більше 3, коефіцієнт дисперсії менше 5 та СКП менше 0,02 м. Якщо хоча б одна із перерахованих умов не виконувалась, вважалось, що рішення отримане з недостатньою точністю і отримане значення не використовувалось в подальших обчисленнях.

Отримані результати успішності опрацювання базових ліній свідчать, що в точках розташованих у центральній частині забудованого квадрата (точки 7-9, 12-14, 17-19) відсоток опрацьованих базових ліній значно вищий, ніж у точках розташованих безпосередньо під перешкодою. Ефективність опрацювання базових ліній мало залежить від тривалості сесії спостереження (для тривалостей від 10 до 2 хвилин зміни практично не перевищують 10%) та

довжини базової лінії (для використаних в дослідженні довжин 1-7 км конфігурація сузір'я видимих супутників на базових станціях практично однакова). Найбільший вплив на успішність опрацювання базових ліній має розмір сторони забудованого квадрату, тобто відстань від приймача до перешкоди. При розмірі сторони квадрату 40 м відсоток опрацьованих базових ліній не перевищує 17 % у будь-якій точці розташування приймача, що є незадовільним для виконання спостережень без попереднього планування.

З аналізу результатів обчислення похибок просторового положення кінцевої точки базової лінії відносно початкової можна зробити висновок про можливість визначення просторового місцеположення з точністю порядку 1-3,5 см при розташуванні приймача у центральній частині забудованого квадрата (точки 7-9, 12-14, 17-19) для квадратів 60, 80 та 100 м та тривалості сесії спостереження 5-10 хвилин. Тривалості сесії спостереження 2 хвилини недостатньо для надійного визначення просторового місцеположення на забудованих територіях. Те ж саме стосується квадрата розміром 40 м (при тривалостях сесії 2-10 хв), що відповідає відстані від приймача, розташованого у центрі, до розглянутої перешкоди – 20 м, або куту відсікання порядку 45-55°. При розмірі сторони квадрата 60 м у точках розташованих у центральній частині можливе досягнення вказаної точності при довжинах базових ліній 1-7 км, але зростає ймовірність появи окремих грубих похибок, що потребує додаткового контролю обчислень (наприклад об'єднання векторів у замкнуті геометричні фігури з подальшим контролем замиканням полігонів).

Результати обчислень середньоквадратичних похибок планового положення залежно від тривалості сесії спостереження, розміру сторони забудованого квадрата та довжини базової лінії наведено у таблиці. Як видно з наведених результатів визначення планового положення кінцевої точки базової лінії відносно початкової можливе з точністю 0,3-3,0 см при наведених умовах опрацювання спостережень за виключенням сесій спостереження тривалістю 2 хвилини, розташування приймача безпосередньо під перешкодою та щільної забудови з відстанню від приймача до 10-ти поверхової перешкоди 20 м (квадрат 40 м).

Аналізуючи результати обчислення середньоквадратичних похибок висотного положення кінцевої точки базової лінії відносно початкової, доводиться констатувати подібну тенденцію, щодо незадовільних результатів при сесії спостереження тривалістю 2 хвилини та розташуванні приймача в умовах щільної забудови (квадрат 40 м) або безпосередньо під перешкодою. Точність висотних визначень у інших розглянутих випадках при цьому знаходиться в межах 0,7-3,5 см. Тобто, в розглянутих умовах також підтверджується стандартне співвідношення точності планових та висотних визначень на рівні 1,5-2,5.

Таблиця

Середньоквадратичні похибки планового положення кінцевої точки базової лінії відносно початкової, мм

Довжина базової лінії, км	№№ точок	Розмір сторони забудованого квадрата, м											
		100			80			60			40		
		Тривалість сесії, хв											
		10	5	2	10	5	2	10	5	2	10	5	2
1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	8.8	19.1	14.6	3.5	-	-	3.5	-	-	-	-	-
	3	40.9	8.4	10.1	4.6	8.8	9.8	3.9	11.6	14.1	-	-	-
	4	46.5	19.4	12.3	45.7	4.7	12.2	22.8	15.8	26.7	-	-	-
	5	91.3	-	-	91.3	-	-	91.3	-	-	-	-	-
	6	13.7	27.5	37.3	13.7	27.6	40.2	17.7	26.1	47.4	-	-	-
	7	3.2	3.2	9.7	3.8	13.8	11.2	3.0	4.0	7.5	-	-	-
	8	4.3	4.7	5.4	4.7	13.3	32.9	3.7	4.6	4.5	6.2	7.6	-
	9	8.3	12.1	42.0	8.0	13.8	57.0	9.8	15.8	56.7	7.0	5.1	-
	10	22.8	39.2	61.0	25.0	42.4	74.2	17.6	28.7	108.6	-	-	-
	11	9.0	24.7	19.3	9.3	12.9	28.7	9.8	11.3	39.2	-	-	-
	12	3.8	5.1	12.5	3.7	6.7	10.7	4.1	9.4	18.4	-	-	-
	13	4.0	4.1	4.4	3.6	3.9	5.4	4.6	5.2	6.0	6.3	7.3	4.9
	14	6.1	8.8	32.6	8.1	14.1	57.0	9.7	16.4	66.1	4.9	13.8	97.2
	15	22.9	40.1	29.6	24.4	45.2	79.3	25.8	50.1	107.8	-	-	-
	16	9.8	25.7	19.8	10.6	28.2	21.9	10.7	14.2	23.3	-	-	-
	17	3.6	5.4	6.5	5.2	7.6	11.2	4.4	9.4	18.2	-	-	-
	18	2.6	3.4	4.4	3.1	4.1	7.8	4.3	5.1	5.4	-	-	-
	19	5.5	34.0	44.1	4.8	36.1	47.3	5.4	12.1	49.4	4.7	-	-
	20	29.5	22.6	1053.3	14.0	23.3	1289.8	-	-	-	-	-	-
	21	15.0	53.0	46.1	15.1	53.0	46.1	15.1	53.0	46.1	-	-	-
	22	6.2	7.0	9.2	6.2	7.0	9.2	12.4	20.7	25.8	-	-	-
	23	8.5	19.4	22.3	10.9	17.3	25.2	-	-	-	-	-	-
	24	32.4	297.2	1059.4	21.1	132.2	1471.6	-	-	-	-	-	-
	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	22.9	33.2	16.6	9.3	-	-	9.3	-	-	-	-	-
	3	23.9	12.9	10.9	7.3	12.9	10.9	6.4	19.0	16.5	-	-	-
	4	31.0	23.1	5.1	26.2	8.7	14.9	14.4	24.8	23.1	-	-	-
	5	23.5	-	-	23.5	-	-	23.3	-	-	-	-	-
	6	16.2	54.8	44.3	18.5	55.0	47.3	13.9	29.1	18.1	-	-	-
	7	7.8	7.4	27.7	9.1	36.7	30.3	8.7	8.6	11.8	-	-	-
	8	9.1	9.3	9.6	8.8	32.8	34.3	6.9	8.0	8.2	6.4	9.3	-

продовження таблиці

4	9	15.3	22.2	30.5	15.6	24.2	41.3	17.4	28.0	40.7	6.7	10.6	-
	10	23.0	33.9	50.3	24.3	35.6	54.1	32.6	52.3	76.9	-	-	-
	11	16.7	63.7	51.0	12.1	21.3	15.1	7.5	28.8	16.9	-	-	-
	12	9.0	10.9	37.3	8.1	8.2	11.9	6.6	9.0	12.9	-	-	-
	13	8.3	8.3	8.3	8.0	8.1	8.2	7.9	8.1	9.1	5.9	10.0	10.6
	14	8.5	11.5	22.9	15.4	24.7	41.2	16.6	28.0	47.5	8.0	19.3	69.9
	15	26.0	26.1	21.1	24.7	38.2	56.9	26.7	41.4	66.3	-	-	-
	16	9.3	86.8	66.0	9.7	95.1	72.2	11.8	34.1	80.8	-	-	-
	17	9.9	10.8	18.3	7.9	11.3	20.0	6.5	8.8	13.6	-	-	-
	18	7.1	7.5	7.3	7.1	8.2	7.8	7.3	7.7	7.7	-	-	-
	19	9.4	16.6	48.1	13.0	17.9	55.9	6.8	13.3	35.6	9.9	-	-
	20	32.2	38.2	35.2	40.3	40.3	38.2	-	-	-	-	-	-
	21	337.0	263.4	160.6	337.0	263.4	160.6	337.0	263.4	160.6	-	-	-
	22	7.6	8.4	8.2	7.6	8.4	8.2	16.1	28.2	13.2	-	-	-
	23	24.5	54.1	64.4	15.3	46.7	71.1	-	-	-	-	-	-
	24	50.1	78.6	311.9	77.0	54.1	179.5	-	-	-	-	-	-
	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	7.3	30.6	42.3	20.7	-	-	20.7	-	-	-	-	-
	3	74.3	19.7	27.3	9.1	19.7	27.3	10.9	32.9	43.6	-	-	-
	4	39.2	69.6	16.8	25.2	13.7	14.0	15.6	30.2	22.1	-	-	-
	5	17.2	-	-	17.2	-	-	16.8	-	-	-	-	-
	6	27.2	57.1	63.5	26.3	57.0	133.3	24.4	56.7	69.7	-	-	-
	7	9.0	9.9	18.5	17.3	17.7	20.5	6.6	10.3	11.3	-	-	-
	8	7.3	5.9	6.8	7.7	11.3	9.7	6.7	4.1	5.4	16.0	10.7	-
	9	5.7	9.6	20.7	7.4	11.7	28.4	15.4	24.9	29.8	18.4	21.0	-
	10	30.8	38.1	44.3	25.6	35.2	47.3	20.6	30.1	59.1	-	-	-
	11	36.1	29.1	35.4	42.9	47.3	40.5	41.0	52.9	43.9	-	-	-
	12	8.3	7.7	10.9	7.2	6.5	115.7	6.5	8.0	12.6	-	-	-
	13	8.2	8.4	7.5	8.7	8.9	8.1	7.3	7.9	10.5	9.6	9.9	19.3
	14	8.6	8.0	10.7	11.3	14.2	25.8	11.2	15.4	29.3	11.0	9.6	22.0
	15	22.5	23.7	24.3	18.5	27.9	42.3	26.6	22.9	43.9	-	-	-
	16	43.0	44.7	64.0	46.1	48.7	70.0	24.8	37.8	77.7	-	-	-
	17	28.1	12.9	14.8	15.0	10.2	250.9	20.5	15.1	21.0	-	-	-
	18	4.8	5.6	5.2	4.7	6.5	8.5	8.6	7.3	12.1	-	-	-
	19	5.9	11.8	32.4	14.3	12.4	37.4	13.6	13.3	28.0	19.5	-	-
	20	25.7	16.1	20.6	10.9	14.4	16.1	-	-	-	-	-	-
	21	229.8	116.5	151.7	809.6	116.5	151.7	229.8	116.5	151.7	-	-	-
	22	23.8	38.1	32.9	23.8	38.1	32.9	44.1	65.9	61.1	-	-	-
	23	58.7	44.4	581.7	66.6	665.1	711.5	-	-	-	-	-	-
	24	62.5	102.3	166.3	64.1	112.6	67.7	-	-	-	-	-	-
	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Висновки. Враховуючи отримані результати, можемо стверджувати, що сесії спостереження тривалістю 2 хвилини недостатньо для отримання надійних результатів при розглянутих умовах. При тривалості сесії 5-10 хвилин та розташуванні приймача у центральній частині забудованого квадрата (точки 7-9, 12-14, 17-19) можливо отримати результати з середньоквадратичними похибками планового положення 0,3-3,0 см та висотного – 0,7-3,5 см. Виключення становить лише забудований квадрат з розміром сторони 40 м, що відповідає відстані 20 м від приймача до перешкоди висотою 30 м. У інших розглянутих випадках цілком реальне досягнення вказаної точності при довжинах базових ліній 1-7 км, але можлива поява окремих грубих похибок, що потребує додаткового контролю обчислень (наприклад об'єднання векторів у замкнуті геометричні фігури з подальшим замиканням полігонів).

Підсумовуючи одержані результати, можемо стверджувати (опираючись на "Положення про земельно-кадастрову інвентаризацію земель населених пунктів"), що при розташуванні приймача не безпосередньо під перешкодою та тривалості сесії спостереження 5-10 хвилин для відстаней 1-7 км можливо використовувати супутникові методи знімань при земельно-кадастровій інвентаризації земель населених пунктів. Крім того, така точність в більшості випадків є достатньою при геодезичному забезпеченні використання лісових та водних ресурсів, геологознімальних пошукових, розвідувальних потреб та експлуатації родовищ корисних копалин відкритим способом, шляхобудуванні тощо, де вимірювання часто необхідно виконувати в умовах лісистої території, значних перепадів висот тощо.

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 2. Монография / К.М. Антонович; ГОУ ВПО "Сиб. гос. геод. академия". – М.: ФГУП "Картгеоцентр", 2006. – 360 с. **2.** Антонович К.М., Яхман В.В. Контроль качества спутниковых наблюдений // Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия: междунар. науч. конгр. "ГЕО-Сибирь – 2006", 24-28 апр., 2006 г. – Новосибирск, 2006. – Т. 1, ч. 2. – С. 54-59. **3.** Большаков В.Д., Гайдаев П.А. Теория математической обработки геодезических измерений. – М.: Недра, 1977. – 367 с. **4.** Генике А.А., Побединский Г. Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. – М.: Картгеоцентр, 2004. – 355 с. **5.** Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика: пер. з англ. – К.: Наукова думка, 1996. – 380 с. **6.** Тревого І., Костецька Я. Точність і ефективність вимірювання взірцевих базисів в сучасних умовах із застосуванням GPS // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва: зб. наук. пр. – Л.: Ліга-Прес, 2000. – С. 169-174. **7.** Черняга П.Г., Янчук О.Є. Дослідження точності GPS-спостережень при закритих частинах горизонту // Геодезія, картографія та аерофотознімання. – 2009. – №71. – С.99-107.

Рецензент: д.т.н., професор Черняга П.Г. (НУВГП)