

УДК 528.48

## ВПЛИВ ЗАКРИТОСТІ ГОРИЗОНТУ НА ТОЧНІСТЬ GPS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ З ПОПЕРЕДНІМ ПЛАНУВАННЯМ

О. Янчук, Є. Бендюг, Р. Шульган

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

Р. Лагоднюк

Рівненський державний аграрний коледж, м. Рівне

**Ключові слова:** точність GPS-спостережень, обмежена видимість, попереднє планування.

### Постановка проблеми

Порівняно з традиційними методами геодезичних вимірювань супутникові технології мають певні переваги. Основними з них є “всезгодність”, незалежність від часу доби і пори року, необов’язковість прямої видимості між пунктами, можливість автоматизації, безперервність вимірювань, висока точність, оперативність, одночасне визначення трьох координат, невеликі габарити обладнання, можливість виконання вимірів під час руху. Серед недоліків варто виділити значну залежність від зовнішніх умов, що передусім вимагає відсутності перешкод для радіовидимості супутників. Тому, ведучи спостереження на територіях з обмеженою видимістю горизонту, виконавець повинен переконатися, що в зоні радіовидимості приймача буде достатня для спостережень кількість супутників [1–3]. Для цього виконують попереднє планування сесій спостереження з використанням спеціальних програмних продуктів, в яких застосована теорія руху супутників. Під час планування визначають кількість та конфігурацію видимих супутників, значення коефіцієнтів DOP у визначений проміжок часу на заданій території. На основі отриманих даних вибирають оптимальний інтервал часу для спостережень. Проте такі дані не дають змоги встановити орієнтовну точність, на яку можна розраховувати при спостереженнях.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

У наших попередніх публікаціях [4–6] досліджено точність опрацювання базових ліній в умовах обмеженої видимості горизонту без виконання попереднього планування. Зокрема, проаналізовано точність визначення просторового місцеположення при розташуванні роверного приймача на території із закритою видимістю почергово на північ, південь, схід та захід [4], для різних варіантів розташування роверного приймача у межах території квадратної форми, оточеної за периметром перешкодою певної висоти [5] та у центрі території округлої форми, оточеної за периметром перешкодою певної висоти [6]. Обчислення виконано при тривалості сесії спостереження 30 та 60 хвилин для базової лінії завдовжки 1 км [4] та при тривалості сесії спостереження 15, 30, 60 та 120 хвилин для базових ліній завдовжки 1, 4 та 7 км [5, 6]. Зазначені сесії спостереження вибрано рівномірно впродовж доби з файла добових спос-

тережень перманентних станцій на початку кожної години. Крім того, для наведених умов опрацювання базових ліній обчислено точність визначення планового та висотного місцеположення.

На основі виконаних досліджень у роботі [8] запропоновано методіку попередньої оцінки можливості виконання GPS-спостережень за обмеженої видимості горизонту та їх орієнтовної точності на основі абрису перешкод без попереднього планування. Для виконання такого оцінювання запропоновано критерій, названий коефіцієнтом закритості горизонту  $k_{закр}$ , та поділ території, в якій передбачається розмістити роверний приймач, на умовні зони придатності до спостережень залежно від значення  $k_{закр}$ . Для кожної умовної зони наведено значення успішності опрацювання базових ліній та орієнтовні середньоквадратичні похибки просторового, планового та висотного положення кінцевої точки базової лінії відносно початкової для сесій спостереження тривалістю 15, 30, 60 та 120 хвилин.

У праці [7] характеристики орієнтовної точності доповнено такими показниками, як 50 % та 95 % довірна ймовірність, а також розширено діапазон сесій спостереження у бік скорочення їх тривалості – 10, 5 та 2 хвилини.

Спираючись на результати виконаних досліджень [4–8], варто відзначити можливість використання GPS-спостережень на територіях з обмеженою до певної межі видимістю горизонту для визначення просторового місцеположення з точністю 1–3 см.

### Постановка завдання проблеми

Ця робота доповнює дослідження, описані у працях [7, 8], показниками точності, яких можливо досягти, виконуючи попереднє планування сесій спостережень в умовах обмеженої видимості горизонту.

### Виклад основного матеріалу проблеми

Отже, у роботі [8] для обчислення коефіцієнта закритості горизонту запропоновано небесну сферу розділяти на 360 секторів по  $1^\circ$  і кожному сектору присвоювати вагу, яка залежить від кута висоти, на який закрито видимість  $\nu$ . За результатами досліджень функціональну залежність для обчислення ваги впливу закритості сектора на точність подано синусоїдальною функцією виду  $\sin^3 \nu$ . Відповідно формула для обчислення коефіцієнта закритості горизонту має вигляд:

$$k_{закр} = \sum_{i=1}^{360} \sin^3 \nu. \quad (1)$$

Для обчислення точності GPS-спостережень з виконанням попереднього планування використано методику, подібну до описаної у праці [5]. Обробка виконувалась у 25 варіантах розташування роверного приймача у межах забудованого квадрата при чотирьох варіаціях розмірів його сторін – 100, 80, 60 та 40 м (рис. 1).

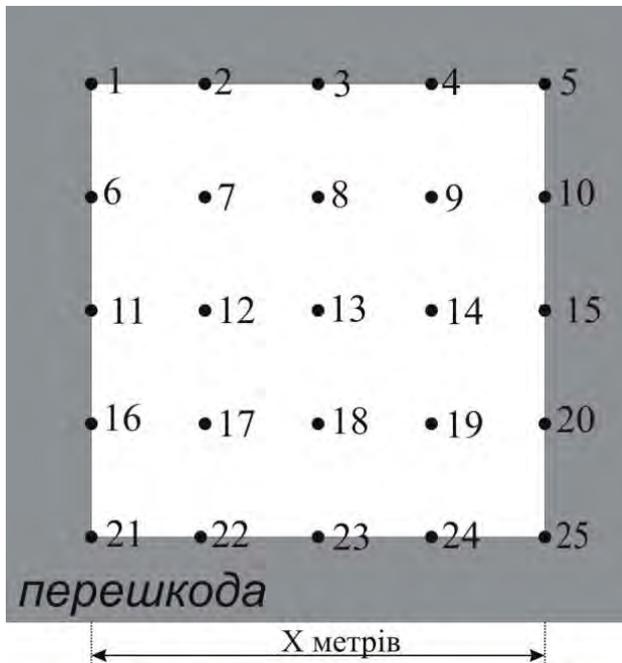


Рис. 1. Варіанти розташування приймача у межах забудованого квадрата

Відмінність методики полягає у тому, що в [5] сесії спостереження вибирали рівномірно впродовж доби на початку кожної години (тобто в обчисленнях точності місцеположення для кожного варіанта розташування роверного приймача використовувалися 24 сесії), а у цій роботі застосоване попереднє планування, з тим, щоб вибрати одну сесію з найоптимальнішими умовами. Відбір виконувався з розрахунку, щоб значення PDOP протягом сесії спостереження було мінімальним, а кількість видимих супутників – якомога більшою. Для кожного зі ста варіантів розташування перешкод навколо приймача було вибрано найоптимальніші сесії спостереження тривалістю 2, 5, 10, 15, 30, 60 та 120 хвилин. Обробку вибраних сесій спостережень виконано у програмі Trimble Geomatics Office для векторів, приблизна довжина яких 1, 4 та 7 км. Загалом у роботі опрацьовано 2100 сесій спостереження (100 варіантів конфігурацій перешкод навколо приймача при трьох варіантах довжин базових ліній та семи варіантах тривалості сесій).

Похибки положення кінцевої точки базової лінії відносно початкової розраховано як відхилення обчислених приростів координат від еталонних, отриманих з web-сторінки SOPAC. За відхиленнями приростів координат знайдено похибки просторового положення, а після трансформації координат у систему Гаусса-Крюгера – планового та висотного положення.

Одержані результати розподілено відповідно до зон закритості горизонту, запропонованих у роботі [8]. Нагадаємо їх характеристику залежно від значення коефіцієнта закритості горизонту:

1. Зона безперешкодного знімання ( $k_{\text{закр}} < 50$ ) – до неї належать множини точок, для яких кут відсікання лежить у межах до  $31^\circ$ , або споруди з висотою над горизонтом до  $50^\circ$ , які закривають азимутальні сектори до  $90^\circ$ .

2. Зона незначного обмеження видимості ( $50 < k_{\text{закр}} < 100$ ) – входять множини точок, для яких кут відсікання міститься в межах до  $40^\circ$ , або споруди з висотою над горизонтом до  $70^\circ$ , які закривають азимутальні сектори до  $115^\circ$ .

3. Зона середнього обмеження видимості ( $100 < k_{\text{закр}} < 150$ ) – належать множини точок, для яких кут відсікання лежить у межах до  $48^\circ$ , або споруди з висотою над горизонтом до  $70^\circ$ , які закривають азимутальні сектори до  $175^\circ$ .

4. Зона значного обмеження видимості ( $150 < k_{\text{закр}} < 200$ ) – містить множини точок, для яких кут відсікання лежить в межах до  $55^\circ$ , або споруди з висотою над горизонтом до  $70^\circ$ , які закривають азимутальні сектори до  $235^\circ$ .

5. Зона екстремального обмеження видимості ( $200 < k_{\text{закр}} < 250$ ) – у неї входять множини точок, для яких кут відсікання міститься в межах до  $62^\circ$ , або споруди з висотою над горизонтом до  $70^\circ$ , які закривають азимутальні сектори до  $300^\circ$ .

6. Зона надекстремального обмеження видимості ( $k_{\text{закр}} > 250$ ) – містить множини точок, для яких кут відсікання більший за  $62^\circ$ .

Використані 100 варіантів конфігурацій закритості горизонту відповідно до представлених зон розподілилися так: зона безперешкодного знімання – 1 точка умовного розташування роверного приймача; зона незначного обмеження видимості – 14; зона середнього обмеження видимості – 12; зона значного обмеження видимості – 13; зона екстремального обмеження видимості – 36; зона надекстремального обмеження видимості – 24. У табл. 1 наведено кількість успішно опрацьованих сесій спостережень, які використано в подальших обчисленнях, залежно від тривалості сесії спостереження та зони обмеження видимості без диференціації за довжинами базових ліній.

Оскільки основна мета дослідження – визначення точності GPS-спостережень в умовах обмеженої видимості горизонту, то при значенні  $k_{\text{закр}} < 50$  обчислення виконано лише для одного варіанта розташування роверного приймача при трьох довжинах базової лінії та різних тривалості сесій спостереження. Тому подальші результати при  $k_{\text{закр}} < 50$  не є абсолютно репрезентативними.

Таблиця 1

**Кількість успішно опрацьованих сесій спостережень, одиниць**

$k_{\text{закр}}$	Тривалість сесії спостереження, хв						
	120	60	30	15	10	5	2
<50	3	3	3	3	3	3	3
50-100	42	42	42	42	42	42	42
100-150	36	36	36	36	36	36	36
150-200	39	39	39	39	38	37	38
200-250	108	104	103	103	104	104	104
>250	72	67	56	46	46	45	40

Для характеристики точності спостережень із попереднім плануванням залежно від коефіцієнта закритості та тривалості сесії спостереження обчислено максимальні, мінімальні та середньоквадратичні похибки визначення положення кінцевої точки базової лінії відносно початкової. У табл. 2–4 наведено характеристики просторової, планової та висотної точності за описаних вище умов опрацювання.

Як бачимо з наведених результатів, попереднє планування дає змогу досягати непоганих результатів навіть у разі значного обмеження радіовидимості супутників. Так, за тривалості сесії спостереження 30–120 хвилин та значенні  $k_{закр} < 250$  середньоквадратична похибка визначення просторового місцеположення

лежить у межах практично 1,5 см. Такої самої точності можна досягти за тривалості сесії спостереження 2–15 хвилин та значення  $k_{закр} < 150$ .

Стосовно точності планових визначень, то середньоквадратична похибка 1 см одержана при тривалості сесії спостереження 10–120 хвилин при величині  $k_{закр} < 250$ , а при сесіях тривалістю 2–5 хвилин – для коефіцієнта закритості до 200. Максимальні похибки за таких умов лежать у межах 3,5 см.

Одержані результати висотних визначень дають змогу говорити про середньоквадратичні похибки приблизно 1 см при тривалості сесії спостереження 30–120 хвилин та значенні  $k_{закр} < 200$  або тривалості 2–15 хвилин та  $k_{закр} < 150$ .

Таблиця 2

**Орієнтовна точність визначення просторового місцеположення кінцевої точки базової лінії відносно початкової (довжина у межах 1–7 км) при GPS-спостереженнях з попереднім плануванням залежно від значення коефіцієнта закритості горизонту**

Коефіцієнт закритості горизонту	Тривалість сесії спостереження, хв																				
	120		60		30		15		10		5		2								
	Характеристики одержаних похибок просторового місцеположення, мм																				
	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП
<50	11.0	6.7	10.5	9.2	7.6	10.4	9.8	6.9	10.8	10.6	8.3	11.9	9.9	8.8	11.3	10.2	7.4	11.1	18.9	3.3	16.6
50–100	13.6	3.4	8.7	16.3	2.8	9.0	20.4	3.4	9.8	16.2	3.1	8.9	27.4	2.9	10.1	15.6	3.1	9.9	22.8	2.6	10.4
100–150	12.1	3.7	8.2	17.5	2.5	8.2	16.9	1.8	9.2	24.6	1.1	8.9	28.6	2.4	9.7	24.3	1.7	9.5	22.8	2.1	10.4
150–200	17.0	1.8	9.4	22.2	2.9	11.8	24.5	2.0	11.1	28.0	3.9	12.8	43.7	2.9	16.1	44.5	1.4	17.9	53.6	1.3	20.7
200–250	23.5	1.7	11.5	28.3	2.2	12.2	47.4	3.3	15.1	57.0	1.4	16.3	61.5	1.6	16.7	66.8	0.9	18.9	107.2	2.9	22.3
>250	60.5	3.4	20.2	59.0	3.7	22.4	30.5	2.8	16.7	142.4	2.7	32.4	65.3	1.7	24.6	69.2	0.9	29.4	67.4	3.1	29.0

Таблиця 3

**Орієнтовна точність визначення планового місцеположення кінцевої точки базової лінії відносно початкової (довжина у межах 1–7 км) при GPS-спостереженнях з попереднім плануванням залежно від значення коефіцієнта закритості горизонту**

Коефіцієнт закритості горизонту	Тривалість сесії спостереження, хв																				
	120		60		30		15		10		5		2								
	Характеристики одержаних похибок планового місцеположення, мм																				
	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП
<50	6.0	1.8	4.7	7.1	1.6	5.3	8.5	1.4	6.2	9.6	0.4	7.4	8.7	1.0	6.6	8.0	2.0	7.0	10.6	2.0	8.8
50–100	8.1	0.4	4.5	8.6	0.6	4.5	9.5	1.0	4.6	14.0	0.4	4.9	26.6	0.4	6.5	12.4	0.5	5.0	12.3	1.0	5.4
100–150	9.0	0.2	4.4	10.0	0.5	4.7	10.8	0.3	5.0	16.5	0.8	5.1	18.6	0.6	5.4	17.1	0.7	5.2	17.4	0.4	5.2
150–200	8.1	1.0	4.8	14.1	0.4	6.4	14.0	0.1	6.3	14.9	0.1	6.4	19.4	0.2	8.0	23.0	0.4	8.1	33.6	0.1	9.7
200–250	18.0	0.1	6.0	14.6	0.2	6.2	22.5	0.2	7.8	28.0	0.2	8.5	31.1	0.7	9.4	35.3	0.2	11.2	68.8	1.0	13.8
>250	32.4	0.2	10.8	30.9	0.9	11.8	22.9	0.6	9.9	91.6	0.8	20.3	37.8	0.3	15.2	63.8	0.3	19.4	47.1	0.2	18.6

**Орієнтовна точність визначення висотного місцеположення кінцевої точки базової лінії  
відносно початкової (довжина у межах 1–7 км) при GPS-спостереженнях  
з попереднім плануванням залежно від значення коефіцієнта закритості горизонту**

Коефіцієнт закритості горизонту	Тривалість сесії спостереження, хв																				
	120			60			30			15			10			5			2		
	Характеристики одержаних похибок висотного місцеположення, мм																				
	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП	макс	мін	СКП
<50	10.5	2.4	9.1	9.1	2.7	8.9	9.7	4.2	8.8	10.1	4.5	9.3	9.8	1.4	9.2	10.0	4.9	8.6	17.8	2.5	14.0
50–100	13.5	0.4	7.5	15.6	0.0	7.7	19.8	0.3	8.6	15.8	0.1	7.5	13.4	0.3	7.7	15.3	0.1	8.5	22.1	0.0	8.9
100–150	11.5	1.4	7.0	16.0	0.2	6.7	16.9	0.2	7.8	18.3	0.3	7.3	21.7	0.0	8.0	17.3	0.3	8.0	18.2	0.2	9.0
150–200	16.6	0.4	8.1	21.0	0.8	9.9	21.2	0.2	9.2	27.2	0.2	11.1	39.2	0.2	14.0	38.1	0.4	15.9	41.8	1.2	18.2
200–250	23.4	0.2	9.8	25.4	0.0	10.4	41.7	0.3	12.9	50.2	0.5	13.9	53.7	0.0	13.7	57.6	0.1	15.3	82.2	0.0	17.5
>250	51.5	0.4	17.1	53.3	0.9	19.1	26.3	0.5	13.5	109.1	0.1	25.2	53.3	0.3	19.4	45.2	0.6	22.0	55.1	0.1	22.3

Варто зауважити, що при виборі сесії спостереження у точках з  $k_{\text{закр}} > 200$  часто йдеться не про вибір сесій з оптимальними значеннями DOP, а про знаходження відрізка часу, коли буде видно хоча б чотири супутники незалежно від їх розміщення.

#### Висновки

Одержані результати дають змогу говорити про значне підвищення точності GPS-спостережень в умовах обмеженої видимості горизонту за рахунок виконання попереднього планування. В таких умовах на територіях із  $k_{\text{закр}} < 150$  (кут відсікання до 48°) отримані СКП просторового, планового та висотного визначення близько 1 см (максимальні відповідно 3, 2 та 2 см) навіть за коротких тривалостей сесій спостережень. Якщо збільшується тривалість сесії спостереження (30–120 хвилин), така точність можлива і при  $k_{\text{закр}}$  до 250 (кут відсікання 62°).

#### Література

1. Гофманн-Велленгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз; пер. з англ. третього вид. під ред. Я. С. Яцківа. – К.: Наукова думка, 1995. – 380 с.
2. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS (ГКИНП (ОНТА)-02-262-02). – М.: ЦНИИГАиК, 2002. – 56 с.
3. Точность GPS-измерений. Планирование проведения работ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.navgeoscom.ru/gps/gps4/gis42.htm>.
4. Черняга П.Г. Дослідження точності GPS-спостережень при закритих частинах горизонту / П.Г. Черняга, О.Є. Янчук // Геодезія, картографія та аерофотознімання. – 2009. – № 71. – С. 99–107.
5. Янчук О.Є. Дослідження точності GPS-спостережень в умовах обмеженої видимості горизонту / О.Є. Янчук // Інженерна геодезія. – К.: КНУБА, 2010. – Вип. 55. – С. 224–235.
6. Янчук О.Є. Дослідження точності GPS-спостережень на забудованих територіях / О.Є. Янчук // Вісник НУВГП. – Рівне, 2009. – Вип. 4 (48). – С. 300–307.
7. Янчук О.Є. Попереднє оцінювання впливу обмеженої видимості горизонту на точність GPS-спостережень / О.Є. Янчук // Вісник геодезії та картографії. – 2010. – № 4. – С. 3–7.
8. Янчук О. Урахування закритості горизонту під час GPS-спостережень для земельно-кадастрової інвентаризації земель населених пунктів / О. Янчук, П. Черняга, Ю. Голубінка // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2010. – Вип. 1(19). – С. 56–61.

#### Вплив закритості горизонту на точність GPS-спостережень з попереднім плануванням

О. Янчук, Є. Бендюг, Р. Шульган, Р. Лагоднюк

Досліджено точність виконання GPS-спостережень в умовах обмеженої видимості горизонту з попереднім плануванням. Наведено характеристики точності таких визначень залежно від значення коефіцієнта закритості горизонту та тривалості сесії спостереження.

#### Влияние закрытости горизонта на точность GPS-наблюдений с предыдущим планированием

А. Янчук, Е. Бендюг, Р. Шульган, Р. Лагоднюк

Исследовано точность выполнения GPS-наблюдений в условиях ограниченной видимости с предыдущим планированием. Приведены характеристики точности подобных определений в зависимости от значения коэффициента закрытости горизонта и длительности сессии наблюдения.

#### Influence of horizon "closure" on accuracy of GPS-observations with the previous planning

A. Yanchuk, E. Bendyug, R. Shulgan, R. Lagodnyuk

Accuracy of GPS-observations with the previous planning under the conditions of limited horizon visibility is investigated. Accuracy of similar determinations are resulted depending on the coefficient of horizon "closure" and duration of observations session.