



чення й контролю метрологічних характеристик усіх типів стендів регулювання розвалу та сходження коліс автомобіля завдяки визначенню автоколімаційним методом геометричних параметрів його ходової частини з похибками, меншими за нормовані похибки стендів. У перспективі для підвищення точності вимірювань та продуктивності праці слід розглянути можливість заміни оптичного окуляра зорової труби автоколімаційного теодоліта на фотоелектричний перетворювач та його відлікового пристрою на камеру.

Література

1. *Самойленко, О.М.* МПУ 050/01-2003. Метроло-

гія. Стенди регулювання розвалу і сходження коліс автомобілів комп'ютеризовані. Методика повірки [Текст] / О.М. Самойленко. – К.: Вид-во ДП "Укрметр-тестстандарт", 2003. – 13 с.

2. *Самойленко, О.М.* МПУ 099/01-2003. Метрологія. Міри кутові спеціальні для контролю метрологічних характеристик комп'ютеризованих стендів регулювання розвалу і сходження коліс автомобілів. Методика повірки [Текст] / О.М. Самойленко. – К.: Вид-во ДП "Укрметр-тестстандарт", 2003. – 10 с.

3. *Самойленко, О.М.* Визначення просторової орієнтації осі обертання динамічного об'єкта геодезичним автоколімаційним методом [Текст] / О.М. Самойленко // Вісн. геодез. та картогр. – 2011. – № 1. – С. 26-29.

Надійшла 20.12.10

* * *

УДК 528.3 : 531.5

О. П. Полець

ВПЛИВ ПОШИРЕННЯ ВІДБИТИХ СИГНАЛІВ НА ТОЧНІСТЬ РОБОТИ GPS-ПРИЙМАЧІВ

По результатам экспериментальных наблюдений с использованием специального устройства установлено влияние многолучевости на точность определения координат объектов в зависимости от расстояния между антенной и отражающей поверхностью для GPS-приемника ATX1230 Smart Antenna фирмы "Leica".

In accordance to experimental observations with the help of a special device it have been established the influence of multipath propagation on accuracy of determination of objects coordinates depending on distance between an antenna and a reflecting surface for GPS receiver ATX1230 Smart Antenna (Leica).

Постановка проблеми. На приймальну антену апаратури споживачів GNSS може надходити не тільки прямий сигнал від навігаційного космічного апарата (НКА), а й множина сигналів, відбитих від земної та морської поверхонь, навколишніх об'єктів. Відбитий сигнал часто накладається на прямий. Це суттєво спотворює корисний сигнал і спричинює похибки при стеженні за його параметрами (затримкою, частотою і фазою). Похибки у багатьох випадках залежать від взаємного розташування НКА, типу приймальної антени апаратури споживача космічних навігаційних сигналів і навколишніх об'єктів, які мають екранувальні властивості.

Приймач GPS генерує на заданій частоті псевдовипадковий кодовий сигнал, який використовується для синхронізації з навігаційним сигналом НКА. Сигнал, що локально генерується, обробляється в ході частотного пошуку для корекції впливу ефекту Доплера. AFC-ланка (Automatic Frequency Control – автоматичне підстроювання частоти) забезпечує захоплення частоти, а COSTAS-ланка (Costas loop – синфазно-квадратурна схема

відновлення несної фази) використовується для захоплення фази. Захоплення каналу відбувається, коли ці процеси досягають стійкої дії.

Супутниковий сигнал надходить з похибкою супроводу. Щоб підтримати максимальну кореляцію між супутниковим і локальним сигналом, використовується зворотний зв'язок за кодом, частотою і відходом частоти. Локальний сигнал, як відомо, використовується для отримання відстані та її приросту за несною фазою.

Похибки багатопрохідності з'являються при проходженні навігаційного сигналу від супутника до приймача внаслідок відбиття від поверхонь. Відбиті сигнали зсувають кореляційний пік і спотворюють теоретично симетричну кореляційну характеристику приймача. Це спричинює похибки у вимірюваннях фази і псевдовідстані.

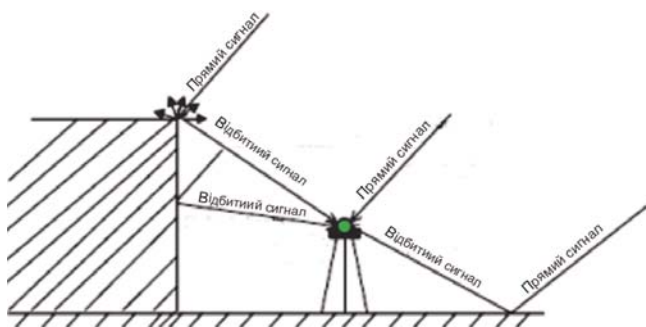
Похибки багатопрохідності властиві як стаціонарним, так і мобільним приймачам. Для мобільних пристроїв шлях навігаційного сигналу і положення супутників змінюються, тому час кореляції похибок багатопрохідності для мобільних споживачів значно менший, ніж для стаціонарних. Похибка коду, викликана ефектом багатопрохідності,

© О. П. Полець, 2011



може трансформуватися в похибку псевдовідстані величиною до кількох метрів залежно від типу і параметрів антени, тоді як похибка фази може сягати лише декількох сантиметрів.

До чинників, які впливають на величину багатошляховості, можна віднести: геометричне розташування та висоту сузір'я супутників над горизонтом, розміри й структуру екранівної поверхні, конструкцію і характеристики антени, рівень відношення "сигнал/шум" (ВСШ), відстань між антеною приймача та відбивною поверхнею, кут падіння сигналів на екран тощо. Типовий варіант відбиття GNSS-хвилі відображено на мал. 1.



Мал. 1

В інструкціях до GNSS-приймачів на підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень вказуються рекомендації щодо послаблення впливу похибок багатошляховості на виміри, але уникнути приймання GNSS-антенами паразитних сигналів у складних умовах практично неможливо. Наявність відбитих сигналів впливає на точність роботи системи GNSS.

Зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Врахування похибок, викликаних відбиттям GPS/ГЛОНАСС-сигналів у різних умовах, дасть змогу передбачати варіант відбиття хвиль та вносити відповідну поправку в результати спостережень, що в свою чергу дозволить розширити можливості застосування GNSS-технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з даної теми. Вплив багатошляховості подібний впливу відбиття радіохвиль від екранівних поверхонь і навколишніх предметів при радіовіддалемірних вимірюваннях. Тому для дослідження ефекту багатошляховості поширення GPS-хвиль на частотах L1 та L2 необхідно розглянути такі фізичні явища, як інтерференція та дифракція радіохвиль, для того щоб можна було змодельовати поширення радіохвиль GPS/ГЛОНАСС.

При розповсюдженні радіохвиль інтерференція виникає передусім через їх відбиття від поверхні Землі, внаслідок чого в кожен її точку приходять дві хвилі – пряма і відбита, які інтерферують одна з одною. Дифракція радіохвиль виникає при зустрічі радіохвиль з перешкодами: радіохвиля, зустрічаючи в однорідному середовищі перешкоду, змі-

нюється за амплітудою і фазою, проникає в область тіні, відхиляючись від прямолінійного шляху. Перешкоди можуть бути довільними за формою, непрозорими або напівпрозорими для радіохвиль.

Похибка відбиття залежить від властивостей відбивної поверхні, її розмірів, навколишньої ситуації, висоти антени та її конструкції, тому в документаціях на СРНС вказується, що її не можна попередньо обчислити. Наприклад, антени, призначені для вимірювань високої точності, мають екран, що виключає попадання на антену сигналу, відбитого від поверхні Землі. Досвід показує, що відбиття спотворює виміри не більше, ніж на кілька сантиметрів, і при належній конструкції антени може бути зменшеним до кількох міліметрів. У зв'язку з рухом супутника цей вплив змінюється з періодичністю близько 10 хв, тому при довготривалих спостереженнях має місце усереднення цієї похибки та зменшення її впливу.

Виробники СРНС проблему багатошляховості GNSS-сигналів пропонують усувати дотриманням умов спостережень і застосуванням нових антен, краще захищених від спотворення GNSS-хвиль.

У праці [1] розглядаються способи та методи зменшення впливу багатошляховості завдяки використанню просторових антен і антенних систем. Використовуючи одночасно сигнали від кількох антен, можна алгоритмічно досягнути зменшення значення похибок відбиття сигналів спільним обробленням даних. При виконанні довготривалих статичних спостережень на пункті для визначення впливу багатошляховості можна використати зміну сили відбитих сигналів. Деякі методи дозволяють виявляти відбиті сигнали, відслідковуючи рівень сигналу або ВСШ (SNR) на вході приймача.

Поряд з просторовими методами для врахування явища багатошляховості активно використовують методи цифрового кореляційного опрацювання сигналів. Продукуванням цих методів займається велика кількість фірм-виробників приймачів СРНС. Так, компанія NovAtel оголосила про випуск покоління GPS-приймачів OEM-V з новою технологією Vision Correlator™ [4]. Ця технологія забезпечує одержання повідомлення про наявність відбитого сигналу і усуває спотворені виміри навіть при низькому горизонті супутників, що майже виключає багатошляховість у складних умовах.

У 24-канальному двочастотному GPS/WAAS/EGNOS-приймачі Trimble 5800 вмонтовано мікрочип Trimble Maxwell™ 4 з технологією відслідковування слабких сигналів. Він забезпечує стійку роботу в складних GPS-умовах та зменшує похибку визначення відбитого сигналу [5].

У праці [2] запропоновано три методи послаблення впливу багатошляховості. У першому випадку прилад запам'ятовує очікувану похибку відбиття як функцію азимута і висоти супутника, з якого надходить сигнал. У другому використано фільтр Калмана, який не пропускає для оброблення відбитий сигнал, у третьому використовується відношення "сигнал/шум" для компенсації ефекту багатошляховості.



Однозначного ж вирішення проблеми відбиття GNSS-сигналів немає. Актуальним залишається питання: як бути користувачам приймачів СРНС, у яких антени не захищені від спотворення GPS-хвиль, як виконувати спостереження в умовах суцільної забудови, де постійно на приймальну антену потраплятиме паралельно з прямим і відбитий від екранівних поверхонь сигнал, і яка при цьому буде величина похибки, викликана явищем багатопляховості.

Постановка завдання. Для визначення координат здійснюють кодові або кодово-фазові вимірювання. В ході кодових вимірювань аналізується зміст повідомлень супутників та вимірюється запізнення сигналу за спеціальними віддалемірними кодами. Аналіз цих даних дозволяє визначити відстані до супутників.

При кодово-фазових вимірюваннях на основі кодових даних визначається положення супутників, а визначення відстані до супутника спирається на спостереження несної фази. Такі вимірювання є похідними від вимірювань різниці між опорним сигналом, сформованим внутрішнім генератором приймача, та сигналом, отриманим від супутника.

Метою дослідження є визначення похибок впливу відбиття супутникових сигналів у системах GPS/ГЛОНАСС під час абсолютних та відносних визначень координат об'єктів на основі кодових і кодово-фазових вимірювань.

Невирішені частини загальної проблеми. Існуючі на сьогодні методи врахування ефекту відбиття GNSS-сигналів не дають змоги виключити систематичну частину похибки. Крім того, невідома причина зміни кількісних параметрів цієї похибки, яка залежить од відстані між антеною та відбивною поверхнею, а також вплив на цю похибку фізичної структури відбивної поверхні (матеріалу, форми, розмірів). Дослідження впливу цих факторів на точність GNSS-вимірів має важливе значення для прискорення впровадження GPS-технологій в умовах, коли суттєво обмежена видимість супутників.

Виклад основного матеріалу. З метою дослідження впливу ефекту багатопляховості в ході абсолютних та відносних визначень координат об'єктів при кодових і кодово-фазових вимірюваннях, встановлення залежностей похибок відбиття GPS- і ГЛОНАСС-хвиль од відстані до екранівних поверхонь, азимута й висоти попадання сигналу на антену та екранівну поверхню було використано спеціальний пристрій. Будову пристрою описано в джерелі [3].

Дослідження проводилось на даху одного з навчальних корпусів НУ "Львівська політехніка" приймачами, які вловлюють сигнали GPS, ГЛОНАСС та GNSS (мал. 2). На спеціальний пристрій було встановлено GNSS-приймач ATX1230 Smart Antenna фірми "Leica", який рухався по колу радіусом 1,59 м з кутовою швидкістю 0,25 об/с. Зміна радіуса кола, описуваного рухом антени, зводилась до мінімуму і була в межах $\pm 0,5$ мм. Коливання антени за висотою було в межах ± 4 см. Для ба-



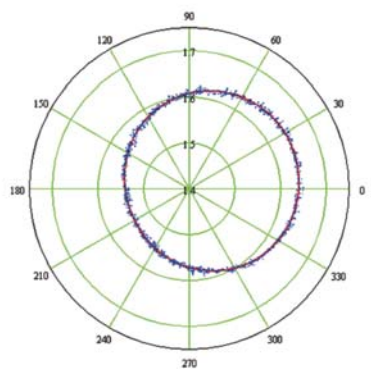
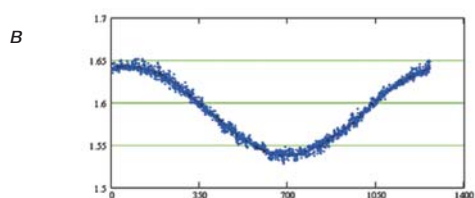
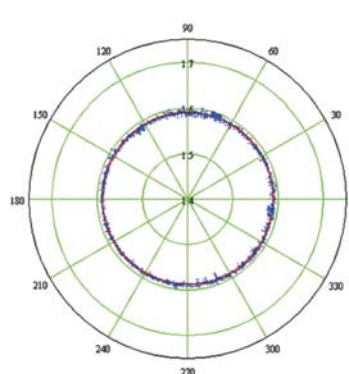
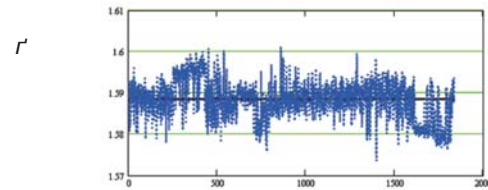
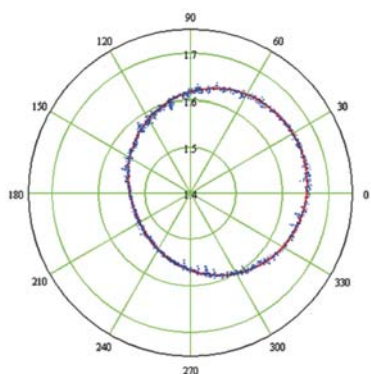
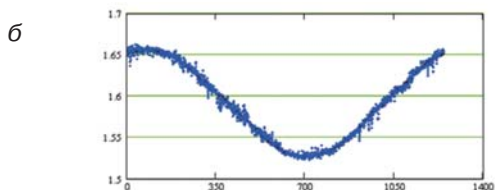
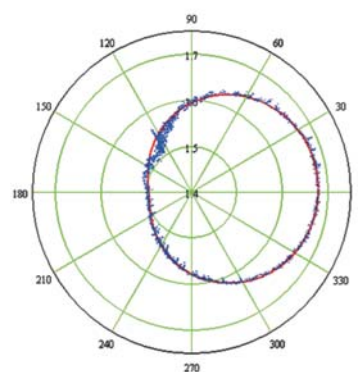
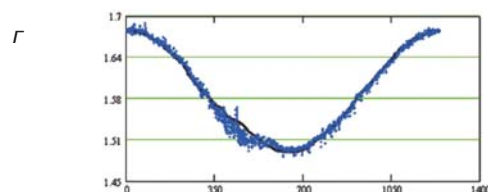
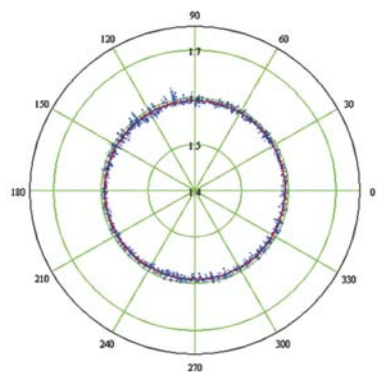
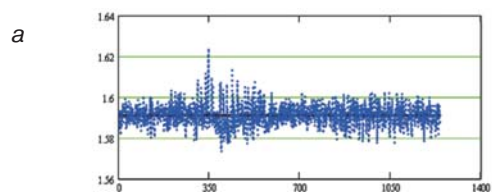
Мал. 2. GPS-приймач на спеціальному пристрої готовий до роботи



зової станції використано двочастотний приймач Leica Smart Station, який знаходився на відстані 20 м від центра пристрою. Як відбивну поверхню використано металевий щит розміром 1,5×3 м. Суть експерименту зводилась до визначення величини похибки відбиття GPS- і ГЛОНАСС-хвиль у різних умовах. Для цього приймач обертався з фіксованою швидкістю навколо центра пристрою. Період запису епохи становив 1 с і збігався з періодом базової станції. Сигнали з супутників, розташованих нижче 15° над горизонтом, не відсікались. Під час обертів антени примусово встановлювалась екранівна поверхня почергово на відстанях 2,5; 2; 1 та 0,3 м від антени. Часові показники обертів антени на кожній з наведених відстаней були однакові та складали близько 20 хв. Після цього відбивну поверхню було усунуто, щоб за результатами сеансу спостережень множина координат миттєвих положень антени Smart Station описала фігуру, яка буде траєкторією руху антени, тобто, щоб траєкторією руху антени стало коло постійного радіуса (мал. 3).

У процесі кодово-фазових вимірювань для кожної мінімальної відстані між антеною та екранівною поверхнею визначались плоскі координати понад 1500-та точок положень антени, які описують псевдотраєкторію її руху. Під терміном "псевдотраєкторія" розуміється функція кола, спотвореного впливом ефекту поширення відбитих сигналів. Положення антени в будь-який момент можна описати рівняннями ряду Фур'є [3]:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + (r + x_c \cos \varphi + x_s \sin \varphi) \cos \varphi; \\y &= y_0 + (r + y_c \cos \varphi + y_s \sin \varphi) \sin \varphi,\end{aligned}\quad (1)$$

де x_0, y_0 – координати центра кола, навколо якого відбуваються колові рухи антени; r – середній радіус-вектор антени GNSS-приймача; x_c, x_s – коефіцієнти ряду Фур'є (c – при косинусі, s – при синусі азимута антени відносно центра кола), які показують відхилення псевдотраєкторії руху антени від кола по осі x ; y_c, y_s – коефіцієнти ряду Фур'є (c – при косинусі, s – при синусі азимута антени відносно центра кола), які показують відхилення псевдотраєкторії руху антени від кола по осі y ; φ – азимут антени.



Мал. 3. Діапазон зміни радіуса-вектора антени та псевдотраєкторія її руху при мінімальній відстані між антеною та відбивною поверхню:
а – 2,5 м; **б** – 2 м; **в** – 1 м; **г** – 0,3 м; **г'** – при відсутності відбивної поверхні;
 – апроксимована рядом Фур'є умовна траєкторія руху антени
 – траєкторія руху антени

Координати миттєвих положень антени визначались у продукті Leica Geo Office, а постоброблення – за створеним алгоритмом програми MathCad. Коефіцієнти ряду Фур'є визначались способом найменших квадратів. Кількість рівнянь (1) відповідає кількості точок, які описують псевдотраєкторію руху антени.

Обчислення параметрів траєкторії руху антени виконувалось з урахуванням ваг вимірів. Для цього все коло було розбито за азимутами на сектори по 1π . Ваги секторів визначались кількістю вимі-



ряних точок. Вага кожного j -го виміру, який знаходиться в i -му секторі, визначалася з такого виразу:

$$P_j = 1/k_i, \quad (2)$$

де k_i – кількість вимірів в i -му секторі.

У результаті врівноважень отримано координати центра траєкторії руху антени $x_0=5524658,057$ м, $y_0=285137,150$ м. Значення радіуса-вектора антени, параметри траєкторії для чотирьох випадків наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Значення середнього радіуса-вектора антени та коефіцієнтів ряду Фур'є в залежності од відстані до відбивної поверхні

Відстань до відбивної поверхні, м	Середній радіус-вектор антени GNSS-приймача r , м	Оцінка точності визначення r , мм	Коефіцієнти ряду Фур'є			
			c , см	Оцінка точності визначення c , мм	s , см	Оцінка точності визначення s , мм
2,5	1,5785	0,35	0,0	0,0035	0,0	0,00035
2	1,5339	0,33	0,06	0,0047	0,024	0,00046
1	1,5383	0,34	0,05	0,0049	0,017	0,00048
0,3	1,4970	0,18	0,092	0,0026	0,06	0,00026
Відбивна поверхня відсутня	1,5915	0,29	0,0	0,0033	0,0	0,00034

Для визначення показників багатошляховості за кодovими вимірюваннями файли результатів спостереження переведено у формат "gipex" для подальшого оброблення за програмою Leica GNSS QC v2.1, призначеною для перевірки даних gipex-формату. Програма дозволяє детально оцінити роботу приймача СРНС та сигналу супутника на частотах L1 та L2 для кожного із спостережуваних супутників за такими характеристиками:

- величиною рівня ВСШ (SNR Skyplot);
- часовими рядами ВСШ (SNR Time Series);
- багатошляховістю (MP1 та MP2 Skyplot);
- значеннями багатошляховості кодovих вимірювань за часом і висотою (Code multipath Time Series);
- значеннями багатошляховості кодovих вимірювань залежно від висоти супутника (Code multipath RMS vs Elevation);
- похибкою роботи годинника приймача (Receiver clock offset) (у мілісекундах);
- ВСШ у залежності від висоти супутника (SNR vs Elevation);
- інформацією треків супутника (Tracking Info).

За програмою Leica GNSS QC v2.1 було проведено аналіз залежностей впливу висоти й ази-

мута супутників та мінімальної відстані між антеною та екранівною поверхнею на величину багатошляховості (мал. 4). Дослідження проводилися по кожному супутнику, сигнали з яких бралися для оброблення результатів вимірювань. Усього в експерименті виконано спостереження за 8-ма супутниками GPS і 6-ма – ГЛОНАСС, а саме: G1, G3, G11, G14, G18, G19, G20, G22; R4, R6, R14, R15, R19, R20.

Визначити величину похибки впливу багатошляховості в залежності від висоти й азимута супутників і мінімальної відстані між антеною та екранівною поверхнею можна з виразу

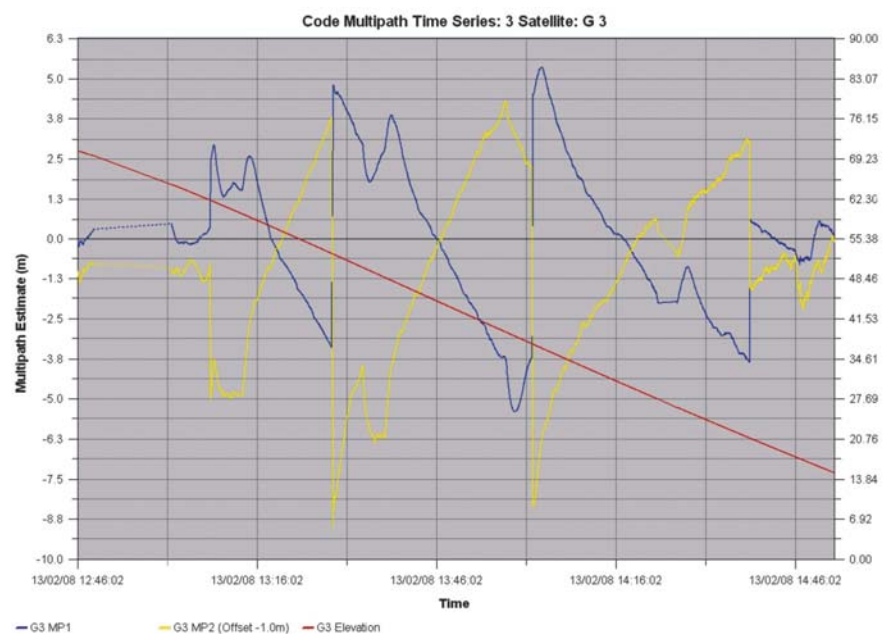
$$MP = b \cdot S \cdot \sin \alpha / 2 \cdot \sin \delta + \Delta, \quad (3)$$

де b і Δ – коефіцієнти; S – відстань до екранівної поверхні; α – горизонтальний кут між супутником та екраном; δ – висота супутника над горизонтом антени; MP – величина багатошляховості в метрах.

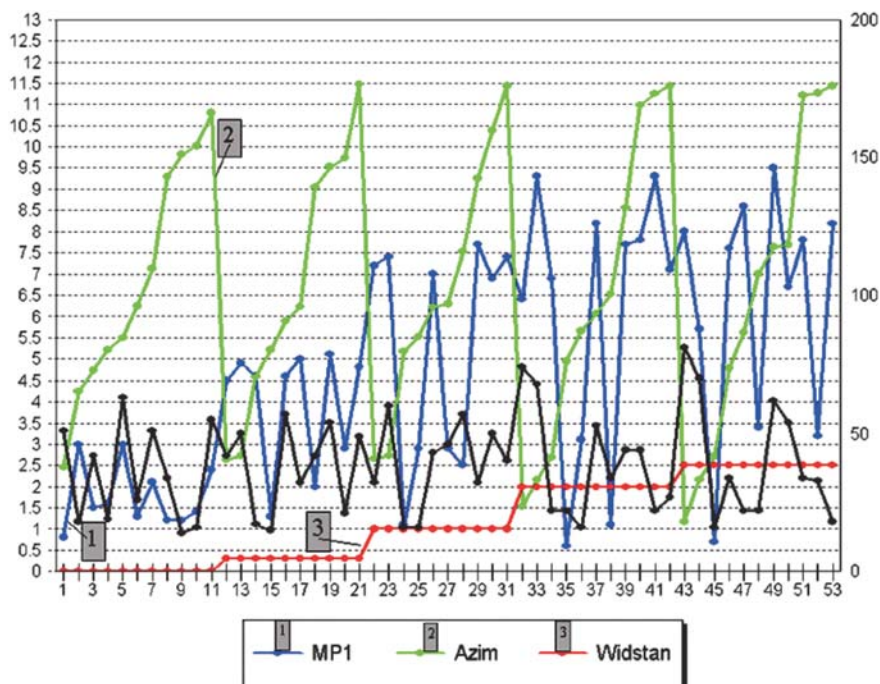
Оскільки в Leica GNSS QC v2.1, як видно з мал. 4, значення величини багатошляховості кодovих вимірювань можна отримати з результатів оброблення сигналів спостережень, то для будь-якого моменту спостереження при певній відстані антени до екрана, для певної висоти супутника і при певному куті між супутником і екраном можна визначити коефіцієнти b і Δ . Знайшовши середні значення коефіцієнтів $b=2,80$ і $\Delta=4,20$ та підставивши їх у вираз 3, отримаємо:

$$MP = 2,80 \cdot S \cdot \sin \alpha / 2 \cdot \sin \delta + 4,20. \quad (4)$$

Проаналізувавши вплив висоти й азимута супутників і мінімальної відстані між антеною та екранівною поверхнею на величину багатошляховості, за програмою Leica GNSS QC v2.1 побудовано графік залежностей цих факторів (мал. 5).



Мал. 4. Приклад оброблення сигналу спостережень програмою Leica GNSS QC v2.1



Мал. 5. Залежність значень багатопляховості сигналу з супутників од відстані, азимута та їх висоти над горизонтом

У табл. 2 значення багатопляховості кодових вимірювань, отриманих за виразом (4), порівнюються зі значеннями багатопляховості, отриманих з кодово-фазових вимірювань.

Таблиця 2. Порівняння величин багатопляховості за кодовими і кодово-фазовими вимірюваннями

Відстань до відбивної поверхні, м	Значення вимірів багатопляховості MP, м	
	кодові вимірювання	кодово-фазові вимірювання
2,5	4,2800	0,0130
2,0	5,4629	0,0575
1,0	6,2521	0,0532
0,3	6,6025	0,0944

Висновки та перспективи досліджень. 1. Аналіз даних експерименту, відтворених на мал. 3, 5 і в табл. 1, засвідчує, що за відсутності відбивної поверхні умовною траєкторією руху антени, апроксимованої рядом Фур'є, буде коло постійного радіуса.

2. Спостереження траєкторії руху антени зафіксовано з боку відбивної поверхні. Величина багатопляховості зростає із наближенням відбивної поверхні до траєкторії руху антени: у кодово-фазових вимірюваннях при відстані до антени 2,5 м $MP=0,013$ м, при відстані 0,3 м $MP=0,0944$ м, а у кодових вимірюваннях величина багатопляхо-

вості сягає 4,28 м та 6,6025 м відповідно.

3. Проаналізувавши мал. 5, можна стверджувати, що сигнали від високих супутників (понад 60° над горизонтом), які знаходяться за азимутами, близькими до 180° од відбивної поверхні, при віддаленні від неї на відстані від 0,3 м до 2,5 м долають більший шлях.

4. За допомогою розробленого пристрою у перспективі з'явиться можливість оцінити вплив багатопляховості на точність визначення місцеположення GPS в залежності од відстані між антеною і відбивною поверхнею та її фізичною структурою. Такі дослідження допоможуть розширити можливості застосування GPS-технологій з урахуванням ефекту відбиття сигналів. Подальші дослідження будуть пов'язані з встановленням відстані, на якій відбивна поверхня має максимальний вплив на точність GPS-вимірів.

Література

1. Поваляев, Е. Системы спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS. Ч. 3. Борьба с многолучевостью [Текст] / Е. Поваляев, С. Хуторной // Инж. микроэлектроника. – 2002. – № 2. – С. 23-30.
2. Pasetti, A. Experimental results on three multipath compensation techniques for GPS-based attitude determination [Text] / A. Pasetti, L. Glulicchi // American Astronautical Society (AAS 99-013), 3-7 February 1999. – P. 138-142.
3. Tretyak, K. Estimation of influence of GPS-signal multipath on the accuracy of positioning determination [Text] / K. Tretyak, V. Glotov, L. Babiy // Reports on Geodesy WUT. – Warsaw, 2005. – № 4. – P. 221-225.

Інтернет-джерела

4. Patrick, C. The Theory and Performance of NovAtel Inc.'s Vision Correlator [Електронний ресурс] / С. Patrick Fenton, Jones Jason // ION GNSS 2005 Long Beach, CA [Режим доступу: http://www.novatel.com/Documents/Papers/ION_Vision_Corrlator.pdf]
5. Trimble 5800 Limited GPS Survey System Available Globally [Електронний ресурс] [Режим доступу: <http://investor.trimble.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=190857>]

Надійшла 21.02.11