УДК 528 **DOI 10.33042/2522-1809-2022-3-170-200-208**

О.О. Воронков, С.Г. Нестеренко, В.В. Касьянов

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНИХ GPS-ВИМІРЮВАНЬ

Відомо, що результати супутникових диференційних вимірювань, як правило, є залежними величинами і характеризуються наявністю фізичної кореляції з тісним лінійним зв'язком. Досліджена залежність коефіцієнта кореляції сигналів, що надходять на супутникові приймачі, від структури похибок вимірів та обґрунтована доцільність використання для індикації наявності впливу багатошляховості на сигнали факту зменшення коефіцієнта кореляції.

Ключові слова: *супутникові сигнали, диференційні виміри, завади, структура похибки, кореляція*.

Постановка проблеми

Незважаючи, що застосування супутникових методів істотно підвисило точність геодезичних вимірів, проблема точності перейшла на новий рівень та потребує нових рішень. На точність GPS-вимірів впливають певні завади, що спотворюють сигнали супутників, один з таких впливів чинить явище багатошляховості. Отже вважаємо за доцільне запропонувати для індикації впливу додаткових завад на супутникові сигнали застосування коефіцієнта кореляції результатів двох синхронних вимірів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Багато вітчизняних та зарубіжних вчених приділяють увагу підвищенню точності навігаційних визначень. Зокрема, у статті [1] авторами досліджено вплив тривалості сесії спостережень на точність вимірів із врахуванням явища багатошляховості. Розроблений метод обчислення такого чинника числової оцінки як коефіцієнт відкритості горизонта, що характеризує обмеженість видимості супутників у пункті спостереження. Запропоновані залежності для тривалості сесії спостереження з врахуванням обмеженої видимості горизонта для попереднього оцінювання точності GPS-спостережень. Питанням подолання багатошляховості також присвячені статті [2] та [3]. Зокрема у статті [2] стверджується, що точність вимірів визначається кутом висоти, на якій закрита видимість, та отже запропонований алгоритм обчислення коефіцієнта закритості горизонту, а також експериментально побудовано функціональну залежність впливу ваги закритості сектора небесної сфери на точність. На підставі отриманих результатів, надані рекомендації щодо оптимальної тривалості сесії спостереження залежно від значення коефіцієнта закритості та певні заходи, серед яких, зокрема, попереднє планування вимірів, використання точних ефемерид супутників, об'єднання базових ліній у замкнені геометричні фігури та використання кількох приймачів для одночасного спостереження. Автори рекомендують під час робіт у великих містах, якщо значення коефіцієнта перевищує 150, найменша тривалість сесії має становити 15 хв, при цьому для виключення грубих помилок бажано проводити додатковий контроль вимірів. Робота [4] присвячена низці актуальних питань, зокрема обґрунтовано висновок, що актуальність питання про тривалість сеансів супутникових знімань під час побудови геодезичних мереж залишається і досі. У роботі досліджено, як залежить точність визначення пунктів мереж від тривалості сеансів спостережень, а також точність визначення віддалей між двочастотними ГНСС-приймачами, що працюють одночасно. Також проаналізовано залежність точності визначення пунктів мереж від кількості і довжин векторів, за параметрами яких визначається пункт. Для використання під час проєктування супутникових мереж з метою отримання оптимальної тривалості спостережень автор пропонує розроблені функціональні залежності. Також у роботі проаналізовано ефективність спільного використання сигналів супутників систем GPS та ГЛОНАСС. Результати дослідження свідчать про те, що одночасне спостереження супутників двох систем підвищує точність визначення положення пунктів супутникових мереж, якщо тривалість сеансів не перевищує 3-х годин. У статті [5] авторами розглянуто особливості математичних методів визначення точності координат за результатами GPS-вимірів та визначено параметри, які варто застосовувати для корегування отриманих координат за допомогою програмних засобів. Аналіз впливу на точність визначення координат геометричних факторів показав їхню залежність від кількості супутників, отже визначено оптимальну кількість

 © Воронков О.О., Нестеренко С.Г., Касьянов В.В.

супутників для досягнення потрібної точності. У статті [6] автор дослідив види основних похибок, що впливають на точність GPS-вимірів у режимі RTK, зокрема похибок орбіт супутників, тропосферної та іоносферної затримки сигналу та похибок GNSS-обладнання. Показано, що застосування надшвидких ефемерид, які майже не впливають на точність визначення координат пересувного приймача, замість бортових, майже усуває проблему похибок, пов'язаних із супутниками. Шляхом обчислень автор визначив, що на відстанях, які не перевищують 100 км, залишковий тропосферний вплив у середньому становить 6 см. Аналіз впливу іоносферної похибки на точність визначення координат пересувного приймача показав, що середня похибка іоносфери становить 2,1 см. На похибки, які пов'язані з GNSS-обладнанням істотно впливає тип вибраної антени, отже зменшити ці похибки можна шляхом застосування якісного двочастотного приймача. У статті [7] розроблено модель похибок диференційних ГНСС-вимірів, та запропоновано застосування цієї моделі як індикатора якості позиціонування. Автор стверджує, що врахування часового кореляційного зв'язку між погрішностями диференційних ГНСС-вимірів є необхідним під час їх опрацювання, зокрема й для багатошляхової складової погрішностей, а також має особливу значущість для розв'язання завдань згладжування як кодових, так і фазових вимірів та для розв'язання фазової неоднозначущості. Статті [8, 9] розглядають поняття кореляції супутникових вимірів та пояснюють причини виникнення фізичної і математичної кореляції. Вказано, що супутникові виміри є корельовані фізично, якщо їх виконали одночасно, оскільки вони піддані спільним зовнішнім впливам певних факторів. Одночасно математичну кореляцію супутникових спостережень автор [8] пояснює вибором математичної моделі. Відзначено, що наявність недіагональних елементів у коваріаційній матриці спостережень свідчить про спотвореність оцінюваних параметрів моделі. Автор [10] стверджує, що результати супутникових GPS-вимірів, які визначені за відносним методом супутникової геодезії, зазвичай є залежними. Ця залежність спричинена їхньою фізичною кореляцією. Досліджено на прикладі геодезичного чотирикутника GPS мережі вплив на зрівняні координати та на оцінки їх точності кореляційних зв'язків погрішностей за координатними осями.

Результати огляду наукових публікацій дозволяють зробити висновок, що питання підвищення точності супутникових вимірів залишаються актуальними, найбільшу похибку надає явище багатошляховості, якому приділено увагу у роботах [1–3, 7]. Кореляція GPS-вимірів є відомим явищем, її наявність враховується програмним забезпеченням приймачів під час опрацювання, врахуванню кореляції вимірів та оцінюванню її впливу присвячено низку наукових робіт, але їх небагато, а отже вважаємо за доцільне запропонувати підхід до визначення явища багатошляховості, що ґрунтується на аналізі змін коефіцієнта кореляції.

Формулювання цілей статті

Дослідження залежності зв'язку сигналів, що надходять на GPS-приймачі, які працюють у диференційному режимі, шляхом аналізу залежності значень коефіцієнта кореляції від структури похибок виміру. З цією метою визначити структуру похибок диференційних вимірів та теоретично обстежити, як впливає вага компонентів похибки на коефіцієнт кореляції. Обґрунтувати можливість використання для індикації наявності впливу додаткових завад на корисний сигнал супутників факту зменшення коефіцієнта кореляції.

Виклад основного матеріалу дослідження

Класичні геодезичні методи вимірювань фундаментально відрізняються від технології вимірювання із застосуванням GPS-технологій об'єктом виміру. За класичними методами вимірюють відстані відносно поверхні геоїда або прямовисної лінії, тобто реалізують фізичний принцип виміру довжин і кутів безпосередньо. У GPS-технологіях вимірюють відстані від супутників до приймача, а отже використовується геометричний принцип виміру відстаней. Оскільки результати супутникових вимірів не пов'язані з геоїдом та з будь-якою системою координат, виникає непроста задача перетворення отриманих результатів у державну систему координат і висот.

Впровадження СРНС у геодезію стало можливим за рахунок вільного доступу до сигналів штучних супутників та ґрунтується на певних прогресивних можливостях, якими є, зокрема, висока продуктивність і точність вимірів [11, 12]. Але методи GPS-вимірювань мають низку недоліків, якими, окрім проблеми перетворення координат, є залежність від завад, висока вартість обладнання та складність програмного забезпечення. На теперішній день накопичений достатній досвід застосування супутникових технологій для виконання геодезичних робіт, проте залишається багато питань, що вимагають коректного розуміння особливостей GPS-технологій.

Для визначення координат застосовують спеціальні супутникові приймачі, які вимірюють тривалість часу проходження сигналів від супутників до приймача, що дає відстані з метровим рівнем точності, або фазу сигналів на несучій частоті, що забезпечує міліметровий рівень точності. Приймач при цьому може працювати як незалежно від інших приймачів, так і синхронно з ними. Робота приймача

в автономному режимі реалізує абсолютний метод вимірів, за якого точність визначення планових координат, як повідомляють фірми-виробники GPS-обладнання, на земній поверхні одночастотними C/A-кодовими GPS-приймачами становить 3–6 метрів. Для отримання вищої точності застосовують фазові виміри при одночасному спостереженні супутників кількома приймачами. Такий метод спостережень називають диференційним, він передбачає розташування одного з приймачів у пункті, координати якого відомі, а розташування інших приймачів визначають відносно першого приймача, що забезпечує точність порядку кількох міліметрів [13].

В супутникових технологіях для визначення координат застосовують виміряні значення таких параметрів як псевдодальності і фази [12]. Псевдодальність P_A^i є різницею часу приймача t_A у момент прийому сигнала t і часом супутника t^i у момент передачі сигнала $t-\tau_A^i$, помноженою на швидкість світла у вакуумі:

$$P_A^i(t) = c \cdot \left[t_A(t) - t^i(t-\tau_A^i)\right] + e_A^i, \qquad (1)$$

де τ_A^i – час проходження сигналу від супутника до приймача; e_A^i – похибка виміру псевдодальності.

Зауважимо, що для виміру псевдодальності застосовують далекомірні коди, отже можливо отримати псевдодальності за стандартним C/A-кодом $P_{C/A}$, або за кодом підвищеної точності $P(Y)$ на першій P_{L1} або другій частоті P_{L2}. Фазу несучої у циклах також можливо вимірювати на першій частоті ϕ_{L1} або на другій частоті ϕ_{L2}. Оскільки точність виміру відстані приблизно становить 1 % довжини хвилі, точність виміру за C/A-кодом становить три метри, а визначена за P-кодом відстань на порядок менша. Але для обмеження доступу неавторизованих користувачів супутники передають зашифрований P-код, називаний Y-кодом [12, 14].

Фаза несучої частоти Φ_A^i є різницею фази ϕ_A сигналу у приймачі в момент приймання сигналу та фазою ϕ^i сигналу супутника на момент передачі сигналу:

$$\Phi_A^i(t) = \phi_A(t) - \phi^i(t-\tau_A^i) + N_A^i + \varepsilon_A^i, \qquad (2)$$

де N_A^i – ціла неоднозначущість фази, яка дорівнює цілому числу хвиль *N*, яке невідоме внаслідок того, що у прийнятому сигналі вимірюється тільки дрібна частина фази; ε_A^i – похибка виміру фази.

Відомо [12], що як для псевдодальностей, так і для фаз несучої застосовують модель, яка являє собою систему рівнянь:

$$B_A^i = p_A^i + b_A + b^i + b_A^i + v_A^i, \qquad (3)$$

де B_A^i – результат виміру, тобто псевдодальність або фаза несучої; p_A^i – геометрична дальність від станції A до супутника i; b^i – поправки від супутника i; b_A – поправки від станції A; b_A^i – поправки спостережень; v_A^i – похибка виміру.

Зауважимо, що потрібні координати визначаються тільки геометричною дальністю, яка є істинною відстанню.

Систему (3) перетворюють на рівняння для псевдодальності та фази окремо [12, 15], причому фазу, виражають в одиницях відстані. З порівняння систем рівнянь для псевдодальності та фази випливає, що в обох рівняннях складниками є геометрична відстань, поправки часу, чинник тропосферної затримки. Проте поправка за іоносферну рефракцію має у цих рівняннях протилежні знаки, замість похибки впливу на псевдодальність врахована похибка багатошляховості фази; складники рівняння псевдодальності за запізнення сигналу в обладнанні замінені членами запізнення в обладнанні для фази несучої. Крім того, рівняння фази несучої містить складник неоднозначущості фази несучої.

У практичних задачах використовують спрощені моделі псевдодальності і фази, рівняння яких є зазвичай нелінійними. Їх лінеаризують шляхом розкладання у ряд Тейлора.

Для розв'язання позиційних задач найчастіше використовують формулу для псевдодальності на частоті L1:

$$P_{A1}^i = \left(p_A^i\right)^0 - u_A^i \cdot dR_A + cdt_A - cdt^i + , \\ + \ I_A^i + T_A^i + d_{A1} + d_1^i + \dot{\epsilon}_A^i, \qquad (4)$$

де $\left(p_A^i\right)^0$ – наближене значення геометричної дальності; u_A^i – вектор часткових похідних від геометричної дальності за координатами; dR_A – вектор положення наземного пункту; cdt_A та cdt^i – затримка сигналу в обладнанні для псевдодальності.

Складники cdt^i, d_{A1}, d_1^i, I_A^i та T_A^i є відомими, а dR_A і cdt_A – потребують визначення.

Рівняння для фази частоти L1 має такий вигляд:

$$\Phi^i_{A1} = \left(p^i_A\right)^0 - u^i_A \cdot dR_A + cdt_A - cdt^i - I^i_{A1} + T^i_A + d_{A1} + d^i_1 + \\ + \lambda_1 N^i_A + \lambda_1 \cdot \left[\phi_{A1}(t_0) - \phi^i_1(t_0)\right] + e^i_{A1}, \qquad (5)$$

де N^i_A – ціла неоднозначущість фази; λ_1 – довжина хвилі.

У похибки псевдодальності і фази включений вплив багатошляховості [15, 16].

Для підвищення точності основних параметрів в моделі має бути якомога менше складників, тобто спрощення моделі виправдане. Але точність основних параметрів має відповідати потенційній точності вимірів, тобто точності, яка гранично досяжна для певного приймача. Цю точність вимірів визначає точність ефемерид та величина шуму.

Параметри моделей вимірів (4) та (5) залежні від низки факторів. Загалом основними джерелами похибок є ефемериди супутників та похибки годинників супутників. Варто відзначити особливо швидкість проходження сигналів, оскільки цей чинник безпосередньо визначає міру дальності і, проходячи через земну атмосферу, піддається змінам швидкості і напряму сигналів. До параметрів, які спричинюють затримки по трасі розповсюдження сигналу, належать тропосферний та іоносферний впливи, а також вплив багатошляховості сигналів. Потрібно відзначити, що поправки часу, як приймача, так і супутників, а також тропосферна затримка зміщують усі виміри на одну й ту саму величину. Похибки спостережень псевдодальності за С/А-кодом – найбільші, а за Р-кодом – дорівнюють кільком дециметрам. Результати фазових спостережень є найточнішими, їхні похибки зневажливо малі. Похибки, викликані багатошляховістю, є найменшими для фази та найбільшими для псевдодальностей, особливо тих, що виміряні за С/А-кодом [16]. Істотного впливу на виміри псевдодальностей надає іоносфера, спотворюючи вимірювані відстані у бік збільшення, а для фазових вимірів – у бік зменшення. Зрозуміло, що залежно від потрібної точності певні похибки можна вважати як істотні та неістотні. Також можна використовувати різні методи для їх врахування. Найчастіше використовують їх виключення шляхом формування різниць параметрів виміру, зокрема одинарні, подвійні або потрійні різниці фаз. Параметри, що отримані як результат віднімання, вважають новими вимірами. Але вони так само містять похибки та є корельованими [15, 17].

Одним з факторів, що спричиняє похибку супутникових вимірів є багатошляховість. Це явище створюється поверхнею землі та полягає у багатократному відбитті радіосигналу супутника від поверхонь на його шляху, а також дифракції радіохвиль сигналу супутника на дрібних предметах у місцях розташування приймачів. Наявність поруч з приймачем асфальтових покриттів, поверхонь водойм, елементів будівель та деревної рослинності змінює шлях сигналу, спотворює його амплітуду і фазу. Джерелами спотворення супутникових сигналів також може бути наявність телевізійних веж та інших мікрохвильових передавачів. Потужність завад може бути суттєвою. У роботі [17] автори припускають, що найбільша похибка від багатошляховості може досягати для С/А-коду 150 метрів, а для Р-коду 15 метрів, але на практиці вона, як правило, не перевершує 10 метрів. У антені приймача при накладенні корисного та спотвореного радіосигналів змінюються амплітуда й фаза сумарного сигналу, а отже вимірювана дальність опиняється спотвореною. Як заходи щодо запобігання або зменшення впливу багатошляховості рекомендується застосовувати двочастотні приймачі із спеціальними антенами або не проводити зйомки у місцях закритого перешкодами небосхилу, а також використовувати для опрацювання вимірів відповідні методи, які не надто прості [1, 2, 6].

Під час проведення координатних визначень за сигналами GPS для оцінювання точності позиціонування доцільно мати певний критерій, який дозволив би індикувати істотність впливу певних завад, що спотворюють корисний сигнал, на похибки вимірів. Ефективне врахування похибок вимірів потребує відповідного аналізу, зокрема виділення компонентів похибки надає змоги визначити їхній вплив на остаточні результати рішення навігаційної задачі залежно від співвідношення компонентів. У статті розглянуто побудову моделі похибок диференційних GPS-вимірів та запропоновано метод індикації наявності впливу багатократного відбиття радіосигналу супутника шляхом обчислення коефіцієнта кореляції результатів вимірів. Обґрунтуємо це завдання низкою міркувань.

З метою підвищення точності застосовують диференційний метод спостереження, сутність якого полягає у використанні щонайменше двох приймачів, один з яких розташовують на опорному пункті з відомими координатами (базова станція), а інший – суміщають з вимірюваним об'єктом. Базова станція формує поправки та передає їх приймачу на вимірюваному об'єкті. Врахування поправок надає можливості істотно підвисити точність координат вимірюваного об'єкту.

Очевидно, що пара результатів диференційних вимірів характеризується наявністю фізичної кореляції [9] та тісним лінійним зв'язком, оскільки, по-перше, сигнали характеризують одні й ті самі параметри, а по-друге, надходять одночасно. Зауважимо, що, як відомо [8], зростання інтервалу часу між вимірами зменшує їхню кореляцію. Спотворення диференційних вимірів відрізняються, але відповідно

до виразів (4), (5) їх визначають одні й ті самі фізичні впливи. Як випливає з виразів (4), (5), сигнали супутників, що надходять на приймачі, є накладенням корисного сигналу та шумів, отже завдання вимірювання параметрів сигналу полягає у виявленні сигналу на тлі завад.

Корисний сигнал супутника спотворюють впливи, зумовлені природними фізичними явищами, зокрема такі як іоносферна та тропосферна рефракція, що впливає на розповсюдження радіосигналів усіх супутників, та впливи, які визначаються особливостями місцевості, на якій розташований приймач. Це такі явища як багатошляховість та наявність ненавмисних й навмисних радіозавад від розташованих поблизу від приймача джерел.

Припустимо, що двома GPS-приймачами проведені синхронні виміри на двох пунктах вимірювань. Пару результатів синхронних вимірів подамо у такому вигляді:

$$X_1 = x_1 + \Delta_1 ; \qquad X_2 = x_2 + \Delta_2 , \tag{6}$$

де X_1 та X_2 – результати виміру; x_1 та x_2 – точні значення вимірюваних значень; Δ_1 та Δ_2 – випадкові похибки отриманої пари значень.

Завдання полягає у дослідженні залежності кореляції результатів вимірів X_1 та X_2 від частки індивідуальної похибки у повній похибці результатів вимірів. Отже будемо вважати, що випадкові похибки Δ_1 та Δ_2 у своїй структурі містять певний спільний компонент, який зумовлений основними джерелами похибок. Як видно з виразів (4) та (5), такими джерелами є тропосферна та іоносферна рефракція навігаційних сигналів, а також інші спільні впливи $\Delta_{сп}$. Індивідуальними для кожного з пари вимірів вважатимемо похибки δ_1 та δ_2, що зумовлені особливостями кожного індивідуального виміру, тобто додатковими шумами та багатошляховістю GPS-спостережень. Тоді рівності (6) набудуть вигляду:

$$X_1 = x_1 + \Delta_{сп} + \delta_1 \qquad X_2 = x_2 + \Delta_{сп} + \delta_2 . \tag{7}$$

Як відомо [18], для числового оцінювання кореляції застосовують коефіцієнт кореляції досліджуваних величин $r_{1,2}$, який визначає їхня коваріація $\mathrm{cov}(X_1, X_1)$ та дисперсії σ_1^2 та σ_2^2:

$$r_{1,2} = \frac{\mathrm{cov}(X_1, X_1)}{\sqrt{\sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2}}. \tag{8}$$

З виразу (7) видно, що похибки вимірів Δ_1 та Δ_2 відповідно дорівнюють

$$\Delta_1 = \Delta_{сп} + \delta_1 \quad \text{та} \quad \Delta_2 = \Delta_{сп} + \delta_2 . \tag{9}$$

Покладемо, що похибки диференційних спостережень не є корельованими, тоді їхні дисперсії σ_1^2 та σ_2^2 можна визначити за виразами:

$$\sigma_1^2 = \sigma_{\Delta_{сп}}^2 + \sigma_{\delta_1}^2 \quad \text{та} \quad \sigma_2^2 = \sigma_{\Delta_{сп}}^2 + \sigma_{\delta_2}^2 . \tag{10}$$

Скориставшись формулою для коваріації [18]:

$$\mathrm{cov}(X_1, X_1) = M[X_1 X_2] - M[X_1] \cdot M[X_2] \tag{11}$$

та враховуючи, що математичні сподівання випадкових складових результатів вимірів дорівнюють нулю [18], тобто:

$$M[\Delta_1] = M[\Delta_2] = M[\Delta_{сп}] = M[\delta_1] = M[\delta_2] = 0,$$

можна показати, що коваріація результатів вимірів X_1 та X_2 дорівнює математичному сподіванню квадрата спільного компонента похибки:

$$\mathrm{cov}(X_1, X_1) = M[\Delta_{сп}^2],$$

причому, оскільки за відомим визначенням дисперсія є різницею математичного сподівання квадрата вимірюваної величини та квадрата її математичного сподівання, тобто $\sigma_{\Delta_{СП}}^2 = M[\Delta_{сп}^2] - M^2[\Delta_{сп}]$. За умови, що $M[\Delta_{сп}] = 0$, остаточно маємо:

$$\mathrm{cov}(X_1 X_2) = \sigma_{\Delta_{СП}}^2 . \tag{12}$$

Отже, коваріація пари результатів синхронних вимірів дорівнює дисперсії спільного компонента похибки вимірів.

Тоді, враховуючи (12), отримаємо для коефіцієнта кореляції вираз:

$$r_{1,2} = \frac{\sigma_{\Delta_{СП}}^2}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} . \tag{13}$$

З метою визначення частки спільного компоненту у дисперсії результатів вимірів для

спрощення будемо вважати виміри рівноточними, тобто $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$, а компоненти похибки результату виміру $\sigma_{\Delta_{сп}}$ та σ_δ – пов'язаними співвідношенням $\sigma_{\Delta_{сп}} = b \cdot \sigma_\delta$. Тоді дисперсія результатів вимірів дорівнюватиме:

$$\sigma = \sigma_{\Delta_{сп}} + \sigma_\delta = b \cdot \sigma_\delta + \sigma_\delta = \sigma_\delta \cdot (b+1),$$

а (13) можна записати як:

$$r_{1,2} = \frac{b}{b^2 + 2b + 1}.$$

Частка спільного компоненту *f* становитиме

$$f = \frac{\sigma_{\Delta_{СП}}}{\sigma} = \frac{b}{b+1}.$$

Шляхом довільного призначення коефіцієнта пропорційності *b* обчислено частку спільного компоненту *f* та значення коефіцієнта кореляції $r_{1,2}$. Отриману залежність коефіцієнта кореляції від співвідношення компонентів похибки виміру $\sigma_{\Delta_{СП}}$ та σ_δ показано у вигляді графіка на рис. 1. Як видно з рис. 1, менші значення частки спільного компоненту *f*, що відповідають посиленню впливу додаткових завад та багатошляховості, зменшують коефіцієнт кореляції $r_{1,2}$. Наприклад, при 67-відсотковому впливі додаткових завад та багатошляховості коефіцієнт кореляції $r_{1,2}$ зменшується до значення 0,8 та ще менших. Але на практиці такі ситуації виникають не часто.

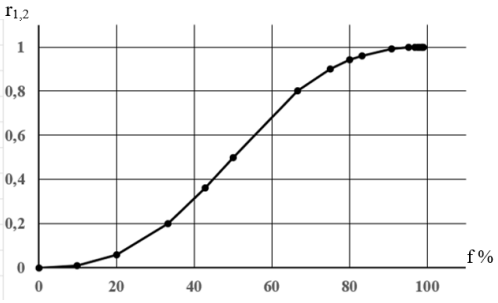


Рис. 1. Залежність коефіцієнта кореляції від структури похибки виміру

Рисунок 2 ілюструє найбільш характерну частину кривої, на якій інтервал частки спільного компоненту *f* становить від 90,9 % до 99,0 %, а відповідні значення коефіцієнта кореляції змінюються від 0,9900 до 0,9999. Отже були відкинуті значення частки спільного компоненту *f*, що менші 75 % як щонайменше імовірні, а відповідно вплив додаткових завад не перевершує 25 %. Очевидно, що при 25-відсотковому впливі додаткових завад $r_{1,2} = 0{,}9$, а при 10 % впливі цих завад $r_{1,2} = 0{,}99$, навіть 5 % впливу відповідає значенню $r_{1,2} = 0{,}9970$.

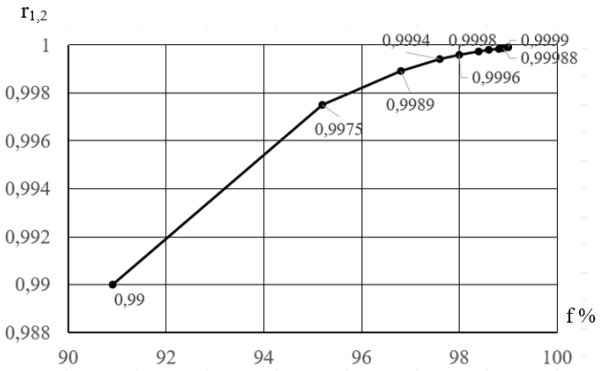


Рис. 2. Характерна частина залежності $r_{1,2}$ від структури похибки виміру

Зазвичай, як випливає з досвіду GPS-вимірів, частка спільного компоненту у похибці двох синхронних вимірів становить понад 97 % від повної похибки виміру за умови відсутності додаткових зовнішніх завад. А отже коефіцієнт кореляції на практиці отримує значення понад 0,999. Це підтверджує крива на рисунку 2, а також той факт, що пара синхронних вимірів є результатами виміру одних й тих самих величин, тому їхня залежність майже функціональна і стає кореляційною внаслідок впливу додаткових спотворюючих факторів.

Вплив додаткових завад на шляху радіосигналу зменшує частку спільної складової у похибці вимірів, навіть якщо до 90-95 % (рис. 2), що одночасно зменшує величину коефіцієнта кореляції. Така залежність вказує на можливість застосування коефіцієнта кореляції як індикатора впливу додаткових завад на результати двох синхронних вимірів.

Для перевірки викладених теоретичних припущень потрібно у подальшому провести експериментальні дослідження.

Висновки

Відомо, що результати супутникових вимірювань, які отримані за диференційним методом, як правило, є залежними величинами і характеризуються наявністю фізичної кореляції з тісним лінійним зв'язком. Побудована модель похибок диференційних вимірів, яка відокремлює вплив завад на сигнал, що надходить на супутниковий приймач. Модель містить два компоненти, перший відбиває завади від основних джерел похибок, таких як тропосферна та іоносферна рефракція, а другий – додатковими шумами та багатошляховістю, які індивідуальні для кожного виміру. Досліджено вплив

співвідношення вказаних компонентів структури похибок вимірів на значення коефіцієнта кореляції сигналів, що надходять на супутникові приймачі, які працюють у диференційному режимі. Як випливає з досвіду супутникових вимірів, частка першого компоненту у похибці двох синхронних вимірів становить понад 97 % від повної похибки виміру за умови відсутності додаткових зовнішніх завад і багатошляховості, при цьому коефіцієнт кореляції на практиці зазвичай отримує значення понад 0,999. Вплив додаткових завад, тобто величина другого компонента похибки, зменшує частку першого компонента у повній похибці вимірів, а отже зменшується коефіцієнт кореляції. Це показує чутливість коефіцієнта кореляції до впливу багатошляховості та дозволяє охарактеризувати кожну серію диференційних вимірів наявністю або відсутністю багатошляховості. Отриманий результат дозволяє рекомендувати використання факту зменшення коефіцієнта кореляції під час виконання координатних визначень для індикації наявності впливу багатошляховості на корисний сигнал супутників.

Література

1. *Охрімчук А.Ю. Оцінювання точності визначення складових векторів залежно від тривалості GPS-спостережень та обмеження видимості небосхилу / А.Ю. Охрімчук, П.Г. Черняга, О.Є. Янчук // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2011. – Вип. 75. – С. 17–25. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/may/1720/gka75201104.pdf*
2. *Янчук О.С. Попереднє оцінювання впливу обмеженої видимості горизонту на точність GPS-спостережень / О.Є. Янчук // Вісник геодезії та картографії. – 2010. – № 4. – С. 3–7. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/vgtk_2010_4_3.pdf*
3. *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. URL: https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/10622*
4. *Пішко Ю.Р. Актуалізація параметрів методики відносних супутникових спостережень для створення опорних геодезичних мереж : дис. канд. техн. наук : 05.24.01 / Пішко Юлія Романівна ; Нац. ун-т «Львівська політехніка». – Львів, 2015. – 182 с. URL: https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1622/arefpishko.pdf*
5. *Бєлов В.С. Особливості визначення точності навігації в системі GPS / Бєлов В.С., Самолюк І.А. // Матеріали XLVII наук.-техн. конф. Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ–2018) [Електронне мережне наукове видання] : зб. доп. – Вінниця : ВНТУ, 2018. URL: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/1/frtzp_2018_netpub.pdf*
6. *Задемленюк А.В. Дослідження впливу похибок на супутникові вимірювання в RTK режимі / А.В. Задемленюк // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2010. – Вип. 73. – С. 25–33. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/may/1851/gka73201006.pdf*
7. *Желанов А.А. Учет составляющих погрешностей и корреляционный анализ при обработке дифференциальных ГНСС-измерений / А.А Желанов // Радиотехника. – 2012. – № 169. – С. 269–276. URL: https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/13745/1/RT_169_269_276.pdf*
8. *Яхман В.В. О математической и физической корреляции спутниковых измерений и пути ослабления ее влияния / В.В. Яхман // Интерэкспо Гео. – 2012. – Т. 1, № 1. – С. 185–189. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-matematiches-koy-i-fizicheskoy-korrelyatsii-sputnikovyh-izmereniy-i-puti-oslableniya-ee-vliyaniya*
9. *El-Rabbany, A.E-S. The effect of physical correlations on the ambiguity resolution and accuracy estimation in GPS differential positioning. – Dept. of Geodesy & Geomatic Eng., University of New Brunswick, Canada, Tech. rept, 1994. – no. 170. – 161 pp. URL: https://unbscholar.lib.unb.ca/islandora/object/unbscholar%3A8565*
10. *Грищенков Е.В. О влиянии корреляции на результаты обработки спутниковых GPS-измерений / Е.В. Грищенков, А.П. Присяжнюк // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. – 2007. – № 6. – С. 132–135. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/326321709.pdf*
11. *Практичні дослідження точності визначення координат за супутниковими технологіями в режимі реального часу / Р.В. Шульц, О.І. Терещук, А.О. Анненков, І.О. Нисторяк // Інженерна геодезія. – 2014. – № 61. – С. 59–77. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Ig_2014_61_10*
12. *Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 1. Моногр. / К.М. Антонович. – М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 334 с. URL: http://gps-rs.scg.ulaval.ca/pdf/%D0%90%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87%20%D0%9A.%D0%9C.%20Russe%202006%20RS1991%20-%20extrait.pdf*
13. *Brown A. Extended differential GPS / A. Brown // Navigation. – 1989. – Vol. 36, No. 3. – P. 265–285. URL: https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=100290*
14. *Beutler G. Accuracy and biases in the geodetic application of the Global Positioning System / G. Beutler, I. Bauersima, S. Botton et al. // Manuscripta geodaetica. – 1989. – Vol. 14. – P. 28–35. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Accuracy-and-biases-in-the-geodetic-application-of-Beutler-Bauersima/7eba2eed406041dbd75afd419455067e69de7bb*
15. *Teunissen P.J.G. GPS for geodesy. Teunissen P.J.G., Kleusberg A. (Eds.). / P.J.G. Teunissen, Y. Bock, G. Beutler et al. – Berlin : Springer, 1998. – 650 p. URL: https://catalogue.nla.gov.au /Record/2911964*
16. *Weill L.R. Multipath mitigation. How good can it get with new signals? / L.R. Weill // GPS World. – Vol. 14, No. 6. – 2003. – P. 106–113. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/How-Good-Can-It-Get-with-New-Signals-Multipath-Weill/84bcb4c4923d22f0ab827bf84f6b07439aeb8392*

17. Rizos C. Principles and Practice of GPS Surveying [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/

18. Большаков В.Д. Теория математической обработки геодезических измерений : учеб. / В.Д. Большаков, П.А. Гайдаев. – 2-е изд. – М. : Недра, 1977. – 367 с.

References

1. Okhrimchuk, A.Yu. (2011). Otsiniuvannia tochnosti vyznachennia skladovykh vektoriv zalezhno vid tryvalosti GPS-sposterezhen ta obmezhennia vydymosti neboskhylu. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia*, 75, 17–25. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/may/1720/gka75201104.pdf [in Ukrainian]

2. Yanchuk, O.S. (2010). Poperednie otsiniuvannia vplyvu obmezhenoi vydymosti horyzontu na tochnist GPS-sposterezhen. Visnyk heodezii ta kartohrafii, 4, 3–7. *URL:* http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/vgtk_2010_4_3.pdf [in Ukrainian]

3. Yanchuk, O., Cherniaha, P., Holubinka, Yu. (2010). Urakhuvannia zakrytosti horyzontu pid chas GPS-sposterezhen dlia zemelno-kadastrovoi inventaryzatsii zemel naselenykh punktiv. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, 1(19), 56–61. URL: https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/10622 [in Ukrainian]

4. Pishko, Yu.R. (2015). *Aktualizatsiia parametriv metodyky vidnosnykh suputnykovykh sposterezhen dlia stvorennia opornykh heodezychnykh merezh*. Dys. kand. tekhn. nauk : 05.24.01; Nats. un-t «Lvivska politekhnika», Lviv. URL: https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1622/arefpishko.pdf [in Ukrainian]

5. Bielov, V.S., Samoliuk, I.A. (2018). Osoblyvosti vyznachennia tochnosti navihatsii v systemi GPS. *Materialy XLVII nauk.-tekhn. konf. Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu (NTKP VNTU–2018).* Vinnytsia, VNTU. URL: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/1/frtzp_2018_netpub.pdf [in Ukrainian]

6. Zademleniuk, A.V. (2010). Doslidzhennia vplyvu pokhybok na suputnykovi vymiriuvannia v RTK rezhymi. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia*, 73, 25–33. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/may/1851/gka73201006.pdf [in Ukrainian]

7. Zhelanov, A.A. (2012). Uchet sostavlyayushchikh pogreshnostey i korrelyatsionnyy analiz pri obrabotke differentsialnykh GNSS-izmereniy, *Radiotekhnika*, 169, 269–276. URL: https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/13745/1/RT_169_269_276.pdf [in Russian]

8. Yakhman, V.V. (2012). O matematicheskoy i fizicheskoy korrelyatsii sputnikovykh izmereniy i puti oslableniya eye vliyaniya. *Interekspo Geo*, 1, 185–189. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-matematiches-koy-i-fizicheskoy-korrelyatsii-sputnikovyh-izmereniy-i-puti-oslableniya-ee-vliyaniya [in Russian]

9. El-Rabbany, A.E-S. (1994). *The effect of physical correlations on the ambiguity resolution and accuracy estimation in GPS differential positioning*. Dept. of Geodesy & Geomatic Eng., University of New Brunswick, Canada, Tech. rept. No 170, 161. URL: https://unbscholar.lib.unb.ca/islandora/object/unbscholar%3A8565

10. Hryshchenkov, E.V., Prisyazhnyuk, A.P. (2007). O vliyanii korrelyatsii na rezultaty obrabotki sputnikovykh GPS-izmereniy. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya F*, 6, 132–135. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/326321709.pdf [in Russian]

11. Shults, R., Tereshchuk, O., Annenkov, A., Nystoriak, I. (2014). Praktychni doslidzhennia tochnosti vyznachennia koordynat za suputnykovymy tekhnolohiiamy v rezhymi realnoho chasu. *Inzhenerna heodeziia*, 61, 59–77. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Ig_2014_61_10 [in Ukrainian]

12. Antonovich, K. (2005). *Ispolzovaniye sputnikovykh radiona-vigatsionnykh sistem v geodezii*. V 2 t. T. 1. Monogr. Moscow, FGUP «Kartgeotsentr». URL: http://gps-rs.scg.ulaval.ca/pdf/%D0%90%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87%20%D0%9A.%D0%9C.%20Russe%202006%20RS1991%20-%20extrait.pdf [in Russian]

13. Brown, A. (1989). Extended differential GPS. *Navigation*, 36 (3), 265–285. URL: https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=100290

14. Beutler, G., Bauersima, I., Botton, S., et al. (1989). Accuracy and biases in the geodetic application of the Global Positioning System. *Manuscripta geodaetica*, 14, 28–35. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Accuracy-and-biases-in-the-geodetic-application-of-Beutler-Bauersima/7eba2eed406041dbd75afd419455067e69de7bb

15. Teunissen, P.J.G., Bock, Y., Beutler, G., et al. (1998). *GPS for geodesy*. Berlin, Springer. URL: https://catalogue.nla.gov.au /Record/2911964

16. Weill, L.R. (2003). Multipath mitigation. How good can it get with new signals? *GPS World*, 14 (6), 106–113. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/How-Good-Can-It-Get-with-New-Signals-Multipath-Weill/84bcb4c4923d22f0ab827bf84f6b07439aeb8392

17. Rizos, C. (1999). Principles and Practice of GPS Surveying. URL: http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/

18. Bolshakov, V., Haidaev, P. (1977). *Teoriya matematicheskoy obrabotki geodezicheskikh izmereniy*. Uchebnyk. 2-e yzd. Moscow, Nedra. [in Russian]

Рецензент: д-р техн. наук, професор К.О. Метешкін, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: ВОРОНКОВ Олексій Олександрович
кандидат економічних наук, доцент, доцент каф. земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – voronkov.oleksii@kname.edu.ua
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6905-0098

Автор: НЕСТЕРЕНКО Сергій Григорович
кандидат технічних наук, завідувач каф. земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – nesterenkosg34@gmail.com
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5124-9728

Автор: КАСЬЯНОВ Володимир Володимирович
кандидат технічних наук, старший викладач каф. земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – volodymyr.kasyanov@kname.edu.ua
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3506-5982

FEATURES OF EVALUATION OF ACCURACY OF GEODESIC GPS MEASUREMENTS

O. Voronkov, S. Nesterenko, V. Kasyanov
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

It is known that the results of satellite measurements, which are obtained by the differential method, are usually dependent values and are characterized by the presence of a physical correlation with a close linear relationship. A model of errors of differential measurements is constructed, in which in order to separate the influence of interference on the signal coming to the satellite receiver, two components are identified, one of which is caused by interference from the main sources of error, are tropospheric and ionospheric refraction of navigation signals. individual measurement, in particular additional noise and multipath of satellite observation signals. The influence of the ratio of these components in the structure of measurement errors on the value of the correlation coefficient of signals received by satellite receivers operating in the differential mode is studied. According to the experience of satellite measurements, the share of the first component in the error of two synchronous measurements is more than 97 % of the total measurement error in the absence of additional external interference and multipath, and the correlation coefficient in practice is usually more than 0.999. This is confirmed by the fact that a pair of synchronous measurements are the result of measuring the same quantities, so their dependence is almost functional, it becomes probabilistic due to the influence of additional interference and multipath, which corresponds to the second component. Obviously, the effect of additional interference on the satellite signal path reduces the share of the first component in the measurement error. At the same time there is a decrease in the correlation coefficient. Analysis of the obtained data shows that in particular in the interval where the effect of additional interference, in particular the second component, does not exceed 25%, at 25% exposure the correlation coefficient takes 0.9, at 10% exposure it is 0.99, 3% exposure corresponds to a correlation coefficient of 0.9968. Therefore, the correlation coefficient is very sensitive to the influence of additional interference and multipath in the path of the radio signal, which is expressed by the second component in the error structure. This makes it possible to characterize each series of differential measurements by the presence or absence of multipath and justifies the use of reducing the correlation coefficient when performing coordinate determinations to indicate the presence of multipath on the useful signal of satellites.

Keywords: *satellite signals, differential measurements, interference, error structure, correlation.*