

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТОЧНОСТІ ТРАЕКТОРНИХ GPS/GNSS ВИМІРЮВАНЬ ПРИ ВИКОНАННІ АЕРОФОТОЗЙОМКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСІВ «ОСТАВА» ТА «GRAFNAV/GRAFNET™»

Вступ

Для вирішення завдань контролю техніко-експлуатаційних характеристик систем навігації й посадки повітряних судів (ПС) та інших літальних апаратів (гелікоптерів, безпілотних апаратів) при льотних випробуваннях актуальним є виконання високоточних траекторних вимірювань з метою оцінки якості бортового навігаційного устаткування і систем керування в цілому [1, 2]. Також актуальна задача високоточного визначення координат при виконанні аерофотозйомки (аерофотограметрії) з використанням сигналів GPS/GNSS.

Для одержання еталонних параметрів руху використовують ті або інші різновиди диференційного методу координатних визначень із використанням як кодових, так і прецизійних фазових спостережень сигналів GPS/GNSS [1, 2]. Для реалізації високоточного диференційного режиму вимірювань на аеродромі (або на трасі польоту), звідки стартує літальний апарат (ЛА), установлюється так звана референсна (базова) двочастотна GPS/GNSS станція. Після проведення аерофотозйомки накопичені результати спостережень бортового й референсного (базового) наземного приймачів спільно обробляються в післясеансному режимі (камеральна обробка). Застосування супутникових технологій для вирішення викладених завдань дозволяє одержати координати повітряного судна з точністю від декількох дециметрів до одиниць сантиметрів.

У цей час в Україні використовуються програмні пакети різних закордонних виробників [2]. Ці пакети в розглянутому випадку виконують обробку кінематичної зйомки з використанням спеціальних методів обробки кодових та фазових GPS/GNSS спостережень. При цьому часто виникають проблеми, пов'язані із зниженням надійності розрізнення фазової невизначеності й одержання високоточних параметрів руху ЛА через значне віддалення ЛА від базової станції (БС), через маневрування та еволюції ЛА й ін. Проблемою є також те, що з використанням «закритих» закордонних програмних пакетів для обробки даних, як правило, не вдається детально проаналізувати вихідні спостереження, оцінити їх якість, виконати об'єктивну оцінку точності траекторних визначень, а в складних випадках – визначити причини низької якості одержання вихідних результатів обробки [2].

Метою даної роботи є експериментальне відпрацювання розроблених алгоритмів та процедур обробки траекторних вимірювань параметрів руху повітряних суден (ПС – літаків, гелікоптерів, безпілотних літальних апаратів) при виконанні аерофотозйомок з використанням сучасних диференційних методів визначення місцеположення по сигналах супутникових систем GPS/GNSS. Технологія траекторних вимірювань, що розробляється, дозволить забезпечити високоточний траекторний контроль руху ПС з дециметровою/субдециметровою точністю в будь-якому місці повітряного простору України, оцінку (атестацію) і моніторинг реальних характеристик бортового навігаційного обладнання літальних апаратів, проведення експериментів по відпрацюванню і аналізу польотних процедур посадки ПС.

В роботі представлені результати попередніх експериментів щодо розробки вітчизняної технології траекторних вимірювань на всіх фазах польоту ПС в режимі післяполітного аналізу спостережень. Для реалізації режиму постобробки використані апробоване покупне програмне забезпечення GrafNav/GrafNet (NovAtel/WPC Inc., Canada), орієнтоване на обробку GPS/GNSS спостережень динамічних об'єктів, та програмне забезпечення вітчизняної розробки «ОСТАВА» для виконання детального аналізу «сирих» GPS-спостережень і реалізації точного місцевизначення. Дається стислий опис виконаних розробок алгоритмів та програмних процедур обробки бортових GPS спостережень з використанням диференційних корек-

цій за кодово-фазовими GPS спостереженнями базових станцій і доведена можливість досягнення дециметрової точності координатних визначень на всій території України. На завершення описані рекомендації щодо підвищення точності та розвитку методів і технологій траєкторних визначень за сигналами GPS/GNSS.

GPS/GNSS технології й засоби, що використовуються для проведення експериментальної оцінки точності траєкторних вимірювань

Знання максимально точної траєкторії ЛА на різних фазах польоту є фундаментальною основою проведення аерофотозйомки та льотних випробувань ЛА.

Як показано в [2], для одержання точної траєкторії (еталонних параметрів руху) використовують такі види (методи) високоточних диференційних DGPS/DGNSS-визначень, як

- класичний диференційний метод визначення місцеположення DGPS/DGNSS з використанням кодових спостережень (метровий рівень точності);
- мережні методи диференціальної корекції WAD/DGPS/MRD (наприклад, фірми Omі STAR/FUGRO);
- метод широкозонної диференційної навігації WADGPS (WAAS, EGNOS і ін.);
- традиційні геодезичні GPS-технології (режим кінематичної зйомки) і устаткування з використанням інтерферометричних технологій обробки фазових спостережень у режимі постпроцесингу.

Дуже важливим питанням є оцінка точності й надійності навігаційних визначень за сигналами GPS/GNSS і широкозонних функційних доповнень, таких як EGNOS, з урахуванням того, що всі повітряні судна з переходом на сучасні технології керування повітряним рухом будуть оснащуватися супутниковими навігаційними приймачами з функціями типу WAAS, EGNOS. Тому технологія траєкторних вимірювань також повинна мати можливість здійснювати атестацію (принаймні, з дециметровою точністю) точностних навігаційних характеристик широкозонних функційних доповнень GNSS на території та в повітряному просторі України:

- використовувати дані спостережень мережі перманентних референційних GPS-станцій IGS/EPN і результати обчислень точних ефемерид, поточних параметрів моделей іоносфери і тропосфери й т. д. в міжнародних обробних центрах IGS як еталонних;
- використовувати спеціальні програмні продукти для оцінки характеристик інших навігаційних підсистем.

Необхідна точність визначення параметрів руху ЛА знаходиться в діапазоні від декількох сантиметрів до декількох дециметрів. Одержати зазначену точність можна тільки з використанням інтерферометричних фазових (використання фазових спостережень, а не кодових) DGPS/DGNSS-технологій. При цьому варіювання в даному діапазоні може допускатися з урахуванням фази польоту. Висока точність потрібна для надійної атестації штатних бортових навігаційних систем і засобів. Атестація при льотних вимірюваннях проводиться методом порівняння бортових навігаційних вимірювань і еталонних вимірювань. І коли йдеться про дециметрову або про сантиметрову точність визначень траєкторії, потрібно визначити миттєве положення фазового центру приймальної GPS/GNSS-антени еталонної траєкторної системи в геоцентричній або географічній системі координат WGS- 84.

Проведення порівняльного аналізу методів (технологій) показує, що на даному етапі досліджень прийнятним варіантом є найбільш доступна технологія траєкторних вимірювань, заснована на використанні геодезичних GPS-технологій (режим кінематичної зйомки) обробки фазових спостережень інтерферометричного типу у режимі постобробки. Така технологія, як показали результати досліджень і експериментів [3, 4] з використанням реальної інформації, дозволяє на даному етапі розробки та досліджень забезпечити дециметрову й, навіть, сантиметрову точність на віддаленні 25-100 км ЛА від базової станції, здійснити надійний контроль якості того або іншого способу визначення параметрів руху за рахунок можливості застосування одночасно декількох технологій обробки спостережень (із застосуванням покупного й вітчизняного програмного забезпечення післясеансної обробки й проведення порівняння їх результатів, застосування кодово-фазових і «чисто» фазових рішень.

Система траєкторних вимірювань (СТВ) має складатися з бортової й наземної складових і включати наземний центр збору, післясеансної обробки, аналізу й архівування спостережень і результатів їх обробки. Бортова частина, відповідно до обраної технології й принципів побудови СТВ, містить у собі вимірювальний (еталонний) GPS/GNSS двочастотний приймач, накопичувач вимірювальної інформації. Наземна частина містить у собі референцну двочастотну GPS/GNSS станцію, що встановлюється в районі аеропорту й використовується при проведенні льотних вимірювань, накопичувач «сирих» спостережень референцної станції для їх передачі в центр збирання, післясеансної обробки, аналізу й архівування спостережень і результатів їх обробки, підсистему збирання спостережень мережі IGS/EPN перманентних GPS-станцій (ГАО НАНУ) для їх використання при спільній обробці з бортовими спостереженнями СТВ з урахуванням даних обробки IGS-центру (прецизійні координати перманентних станцій, точні ефемериди супутників GPS, результати іоносферного картографування й ін.). Центр збору, післясеансної обробки, аналізу й архівування спостережень і результатів обробки здійснює завершальну стадію «тонкої» остаточної обробки спостережень бортових навігаційних систем і СТВ й відображення всебічних результатів порівняння навігаційних визначень штатних навігаційних систем ЛА і еталонної траєкторії руху. При цьому буде використовуватися вся доступна вимірювальна інформація від всіх джерел для одержання максимально надійних і точних результатів.

Для здійснення поставлених цілей використовуються наступне програмне забезпечення (ПЗ):

- GrafNav/GrafNet (NovAtel/WPC), орієнтоване на обробку GPS/GNSS-спостережень динамічних об'єктів;
- спеціалізоване програмне забезпечення «ОСТАВА» для виконання післясеансної обробки й детального аналізу «сирих» GPS/GNSS спостережень (розробка ГАО НАНУ).

Спільне використання вказаних програмних засобів дозволить вирішити повною мірою визначені завдання траєкторних вимірювань.

Короткий опис використаного програмно-алгоритмічного забезпечення (ПАЗ) «ОСТАВА» обробки GPS спостережень для реалізації технології траєкторних вимірювань [5].

Базовий програмно-алгоритмічний комплекс «ОСТАВА» розроблений в Головній астрономічній обсерваторії (ГАО) НАН України під керівництвом академіка НАНУ Я.С. Яцківца за участю співробітників ХНУРЕ – авторів даної роботи. Він призначений для інтерактивної/автоматизованої роботи в обробних центрах і виконання попередньої обробки («препроцесінгу»), аналізу первинних «сирих» GPS-спостережень, формування диференціальних мережних (мультиреференсних) зональних (MRD – Multi-Reference Differential corrections) корекцій і точного визначення місцеположення в режимі постобробки. Комплекс реалізує MRD-позиціювання з точністю (95%) 1-2 дм у кінематичному режимі зйомки (рухомий споживач з одночастотним (L1) GPS приймачем) і 5-15 см у статичному режимі спостережень з використанням розріджених мереж двочастотних референсних/базових станцій на великих територіях (вимірювальні бази 300-500 км). Зараз це програмне забезпечення є перспективним аналогом технології «H-Star» фірми Trimble.

Суттєві елементи цього програмно-алгоритмічного забезпечення – повне усунення фазових циклічних стрибків («сліпів») на одній або обох частотах GPS (це дозволяє значно підвищити точність згладжування (code/carrier) спостережень, надійність розрізнення фазової невизначеності), виконання контролю якості (QC – quality control) кодових та фазових спостережень і бортової ефемеридної інформації, виділення й оцінка багатопроменевої складової кодових C/A і P2 спостережень та ряду інших важливих операцій. Інформацію про можливості програмного забезпечення «ОСТАВА» можна знайти в [5].

Базовий програмно-алгоритмічний комплекс «ОСТАВА» містить у собі дві групи програм – попередньої обробки, аналізу і контролю якості спостережень базових станцій і спостережень споживачів (роверних приймачів), а також програми високоточного визначення поточного

місцеположення споживачів.

В даний час весь комплекс «ОСТАВА» реалізований у середовищі MATLAB 7.0.4 і являє собою набір з ~80 спільних для всіх пакетів ПАЗ бібліотек різної складності з відкритим кодом узагальнених сценаріями обробки. ПАЗ ОСТАВА може бути кваліфікований і як «Програмний інструментарій розроблювача» (Software Development Kit), що має широкі можливості по доробці, вдосконаленню і модернізації ПЗ. Елементи комплексу «ОСТАВА» також можуть бути використані з іншими програмними продуктами, наприклад, з метою організації центрів потокової обробки вимірювальної інформації.

Методика проведення експериментів з метою оцінки точності GPS/GNSS технологій траєкторних вимірювань

Для забезпечення вирішення поставленого завдання оцінки точності траєкторних вимірювань з використанням розробленої технології й програмного забезпечення «ОСТАВА» і інших характеристик координатних визначень на основі DGPS/DGNSS технологій потрібні також відповідні еталонні методи й засоби.

Широко відомий підхід припускає в ході тестування при проведенні спостережень паралельно реалізувати два способи обробки спостережень, один з яких є тестованим, а другий - еталонним. Накопичені «сирі» спостереження, що включають і високоточні двочастотні фазові спостереження, дозволяють із використанням аналогічного набору даних референційної (базової) станції оцінити із сантиметровою точністю статичні й/або кінематичні поточні координати антени «роверного» (бортового) двочастотного приймача. Для цього необхідно використовувати апробоване програмне забезпечення високоточної післясезансної обробки для визначення еталонних координат із сантиметровою або навіть міліметровою точністю. Зокрема, для обробки реальних даних спостережень (на борту літака АН-30 під час виконання повного циклу робіт з аерофотозйомки) використовувалося програмне забезпечення GrafNav/GrafNet.

Слід відзначити, що досягнення сантиметрової точності траєкторних вимірювань досягається за умови початкової ініціалізації вимірювань з нерухомим (протягом 10-20 хв) об'єктом, коли базова станція й об'єкт перебувають недалеко один від одного (на відстані не більш декількох кілометрів). Крім того, принципово важливо, щоб у процесі польоту (відразу після виконання ініціалізації) не було розривів спостережень одночасно з усіма супутниками, важливо, щоб одночасно спостерігалось не менш 4-5 супутників аж до закінчення польоту. Це є серйозним недоліком традиційних геодезичних технологій, але виконання всіх перелічених умов необхідне для надійного розрізнення фазових невизначеностей. У запропонованій авторами технології позиціонування зазначений недолік відсутній.

Координатна прив'язка базових станцій у заданій системі координат (у нашому випадку всі розрахунки виконувалися в системі WGS-84) має виконуватися заздалегідь із використанням спостережень і точних координат найближчих перманентних референційних GPS станцій, що входять до міжнародної мережі IGS.

Для досягнення мети тестування точності траєкторних вимірювань запропонованим методом потрібно, щоб еталонні координати або просторові параметри руху «роверного» приймача були відомі з точністю, хоча б у кілька разів більшою, ніж точність засобів місцевизначення, що перевіряються. Тоді аналіз розбіжностей (нев'язок) між оціненими координатами, отриманими з використанням технологій, що тестуються, і еталонними координатами дозволить достовірно оцінити точність засобів місцевизначення, що контролюються. У цьому й полягає методика тестування точності визначень.

Квазіоптимальний алгоритм зважування диференційних корекцій мережі базових станцій – варіант реалізації MRD корекцій

Для високоточних координатних визначень динамічних об'єктів були розроблені алгоритм та програмне забезпечення формування мережних диференційних корекцій кодово-фазових GPS спостережень, виконаних на борту ЛА. Нижче наводиться стислий

опис алгоритму реалізації MRD корекцій для траєкторних визначень, який був підданий дослідженням.

Оцінка диференційної корекції (виправлення), сформованої для j -го супутника шляхом зваженого усереднення диференційно-коригувальної інформації мережі базових станцій (БС), має вигляд [3]:

$$\tilde{K}_j = \mathbf{p}_j^T \cdot \tilde{\mathbf{V}}^j,$$

де $\tilde{\mathbf{V}}^j = \mathbf{A}_j \Delta \mathbf{X}_j + \alpha_j \mathbf{I} + \Delta + \Delta_j^{\text{атм}} + \delta_j$ – вектор диференційних корекцій, сформованих окремими станціями мережі для j -го супутника (N – кількість БС, що входять до складу мережі); \mathbf{p}_j^T – вектор вагових коефіцієнтів диференційних виправлень окремих станцій мережі для j -го супутника; $\dim \tilde{\mathbf{V}}^j = [N \times 1]$ $\Delta \mathbf{X}_j = (\Delta X_j, \Delta Y_j, \Delta Z_j)^T$ – вектор похибок визначення координат j -го навігаційного супутника за даними бортових ефемерид; \mathbf{I} – одиничний вектор; α_j – похибка вимірювань, зумовлена неточністю виправлення, яку обчислено за бортовими ефемеридами для компенсації розбіжності шкал часу j -го супутника й супутникової системи; Δ – вектор похибок вимірювань, зумовлений неточною синхронізацією шкал часу БС й супутникової системи за результатами навігаційно-часових визначень самих БС; $\Delta_j^{\text{атм}}$ – вектор похибок вимірювань БС мережі, що викликані впливом середовища поширення сигналів навігаційних супутників (іоносфери й тропосфери); δ_j – просторово некорельовані складові погрішності вимірювань – вплив багатопроменевго поширення сигналів і шумів різного по-

ходження; $\mathbf{A}_j = \begin{pmatrix} \tilde{a}_{1j}^x & \tilde{a}_{1j}^y & \tilde{a}_{1j}^z \\ \dots & \dots & \dots \\ \tilde{a}_{Nj}^x & \tilde{a}_{Nj}^y & \tilde{a}_{Nj}^z \end{pmatrix}$; де $\tilde{a}_{ij}^x, \tilde{a}_{ij}^y, \tilde{a}_{ij}^z$ – оцінки частинних похідних відстані між

i -ю БС і j -м навігаційним супутником за координатами супутника (направляючі косинуси вектора “ i -а БС – j -й супутник”):

$$\tilde{a}_{ij}^x = \frac{\tilde{X}_j - x_{\text{БС}_i}}{\tilde{R}_{ij}}, \quad \tilde{a}_{ij}^y = \frac{\tilde{Y}_j - y_{\text{БС}_i}}{\tilde{R}_{ij}}, \quad \tilde{a}_{ij}^z = \frac{\tilde{Z}_j - z_{\text{БС}_i}}{\tilde{R}_{ij}};$$

$\tilde{R}_{ij} = \sqrt{(\tilde{X}_j - x_{\text{БС}_i})^2 + (\tilde{Y}_j - y_{\text{БС}_i})^2 + (\tilde{Z}_j - z_{\text{БС}_i})^2}$ – відстань між i -ю БС і j -м супутником; $x_{\text{БС}_i}, y_{\text{БС}_i}, z_{\text{БС}_i}$ – координати i -ї БС; $\tilde{X}_j, \tilde{Y}_j, \tilde{Z}_j$ – координати j -го навігаційного супутника, обчислені за бортовими ефемеридами.

Основним завданням при усередненні диференційної коригувальної інформації мережі станцій є вибір вагових коефіцієнтів. Оптимізуємо вектор \mathbf{p}_j^T таким чином, щоб максимально компенсувати у споживача похибки вимірювань, зумовлені неточністю бортових ефемерид і відходом годин супутника. Існують різні шляхи вирішення цього завдання. Одним з можливих методів оптимізації вектора вагових коефіцієнтів є його завдання у вигляді:

$$\mathbf{p}_j^T = \tilde{\mathbf{G}}_j^T (\tilde{\mathbf{A}}_j^T \tilde{\mathbf{A}}_j)^{-1} \tilde{\mathbf{A}}_j^T,$$

де $\tilde{\mathbf{A}}_j = \begin{pmatrix} \tilde{a}_{1j}^x & \tilde{a}_{1j}^y & \tilde{a}_{1j}^z & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{a}_{Nj}^x & \tilde{a}_{Nj}^y & \tilde{a}_{Nj}^z & 1 \end{pmatrix}$; $\tilde{g}_{Cj}^x, \tilde{g}_{Cj}^y, \tilde{g}_{Cj}^z$ – направляючі косинуси вектора «споживач – j -й супутник»:

$$\tilde{g}_{Cj}^x = \frac{\tilde{X}_j - \tilde{x}_C}{\tilde{R}_{Cj}}; \quad \tilde{g}_{Cj}^y = \frac{\tilde{Y}_j - \tilde{y}_C}{\tilde{R}_{Cj}}; \quad \tilde{g}_{Cj}^z = \frac{\tilde{Z}_j - \tilde{z}_C}{\tilde{R}_{Cj}};$$

$\bar{R}_{c_j} = \sqrt{(\bar{X}_j - \bar{x}_c)^2 + (\bar{Y}_j - \bar{y}_c)^2 + (\bar{Z}_j - \bar{z}_c)^2}$ – відстань між споживачем і j -м супутником;
 $\bar{x}_c, \bar{y}_c, \bar{z}_c$ – оцінки координат споживача.

Інший варіант вирішення поставленого завдання полягає в тому, щоб при оптимізації вектора \mathbf{p}_j^T прагнути компенсувати тільки ефемеридні похибки вимірювання споживача:

$$\mathbf{p}_j^T = \mathbf{G}_j^T (\mathbf{A}_j^T \mathbf{A}_j)^{-1} \mathbf{A}_j^T,$$

де $\mathbf{G}_j^T = (\bar{g}_{c_x}^j \quad \bar{g}_{c_y}^j \quad \bar{g}_{c_z}^j)$, але потребувати при цьому рівності суми вагових коефіцієнтів одиниці:

$$\mathbf{p}_j^T \mathbf{I} = 1.$$

Як показано в [3, 4], виконання цієї умови гарантує повну компенсацію у вимірюваннях споживача компоненти похибки, викликані неточною синхронізацією шкал часу супутника й супутникової системи. У випадку оцінювання тільки координатних параметрів супутника без накладення будь-яких додаткових умов сума вагових коефіцієнтів диференційних виправлень БС відрізняється від одиниці на величину

$$\varepsilon_j = \mathbf{G}_j^T (\mathbf{A}_j^T \mathbf{A}_j)^{-1} \mathbf{A}_j^T \mathbf{I} - 1,$$

яка входить до складу оцінки мережного диференційного виправлення в такий спосіб:

$$\bar{K}_j = \mathbf{p}_j^T \bar{\nabla}^j = \mathbf{G}_j^T \Delta \mathbf{X}_j + \alpha_j (1 + \varepsilon_j) + \mathbf{p}_j^T \Delta + \mathbf{p}_j^T \Delta_j^{\text{атм}} + \mathbf{p}_j^T \delta_j.$$

Звідси видно, що величина ε_j є додатковим компонентом похибки, що впливає на точність корекції вимірювань споживача. Однак, в ході проведених досліджень було встановлено, що для мережі з 3 – 5 станцій на території України величина $\varepsilon_j < 10^{-3}$. Це означає, що залишкова похибка компенсації частотно-часових супутникових похибок не перевищить сантиметровий рівень, і, отже, нею можна знехтувати.

Таким чином, квазіоптимальний алгоритм мережної обробки диференційних виправлень, що не включає в оцінюванні параметри похибок шкал часу супутників, практично не уступає іншим алгоритмам за точністю, але перевершує їх за простотою реалізації. У зв'язку з цим саме він був вибраний для тестування на реальних даних.

Результати експериментальних досліджень з метою оцінки точності запропонованої GPS/GNSS технології траєкторних вимірювань

GPS вимірювання проводилися на територіях Київської й Одеської областей. На території аеродромів і на борту ПС (літак, гелікоптер) були встановлені двочастотні GPS приймачі геодезичного класу Trimble 5700. Вимірювальна інформація для виконання досліджень була отримана й надана комерційною фірмою «Магеллан» (м. Київ).

Для одержання еталонних траєкторій (усього в обробку було взято дев'ять сеансів вимірювань на всіх фазах польоту ПС (зліт, обліт території, посадка) була виконана статична ініціалізація перед початком польоту. Під час польоту ПС проводилося неперервне накопичення спостережень приймачами базових станцій. При цьому були отримані набори спостережень тривалістю 4 і більше годин. Під час проведення зальотів віддалення ПС від базових станцій досягало 100-130 км.

У післясеансному режимі були оброблені вказані три набори отриманих вимірювань. Для проведення обробки використовувалися спеціалізовані пакети GrafNav/GrafNet і «ОСТАВА».

Для одержання еталонних траєкторій польотів ПС використовувалося програмне забезпечення GrafNav. За допомогою пакета GrafNet були визначені координати базових станцій відносно перманентних IGS/EPN станцій GLSV (Голосієво, ГАО НАНУ) і MIKL (Миколаїв). Після визначення еталонних координат базових станцій за допомогою пакета GrafNav були отримані еталонні траєкторії руху ПС.

Реалізація методики тестування точності траєкторних визначень з використанням комплексу «ОСТАВА», доповненої вищенаведеним алгоритмом MRD коригування бортових GPS спостережень, виконувалася в кілька етапів:

Етап 1. Кінематична зйомка із статичною ініціалізацією – обліт територій Київської та Одеської областей при виконанні аерофотозйомки. Накопичення вимірювальної інформації на базових станціях.

Етап 2. Визначення еталонних координат базових станцій. Формування еталонних траєкторій за допомогою програмного пакету GrafNav/GrafNet.

Етап 3. Обробка вимірювань пакетом «ОСТАВА», яка проводилася за наступним алгоритмом.

Крок 1. Обробка вимірювань базових станцій пакетом «ОСТАВА_PPA_STATIC», одержання звітів про якість вимірювальної інформації.

Крок 2. Обробка бортових вимірів ПС пакетом «ОСТАВА_PPA_KINEMATIC», одержання звітів про якість вимірювальної інформації.

Крок 3. Обробка бортових вимірювань ПС і базових станцій пакетом «ОСТАВА_DGPS», одержання DGPS-рішень за кодовими спостереженнями, їх згладжування з використанням точних фазових «безстрибкових» спостережень – після обробки пакетами «ОСТАВА_PPA» попередньої обробки та уникнення фазових стрибків – «сліпів».

Крок 4. Порівняння рішень, отриманих за допомогою ПАЗ «ОСТАВА», з еталонними. Одержання та аналіз нев'язок рішень.

Нижче наведені характерні результати експериментальних досліджень на прикладі обробки GPS спостережень одного з даної серії сеансів вимірювань. На рис. 1, 2, 3 представлені результати одержання еталонних траєкторій при використанні ПЗ GrafNav/GrafNet графічні зображення еталонних траєкторій польоту ПС (зміни планових координат та висоти ПС на всіх фазах польоту), а також оцінки точності положення ПС («внутрішня» оцінка точності ПЗ GrafNav/GrafNet), тобто оцінки RMS нев'язок фазових рішень. На рис. 4, 5, 6 наведені графічні приклади підсумкових обчислень нев'язок результатів траєкторних вимірювань, отриманих з використанням еталонного ПЗ GrafNav/GrafNet і розробленого програмно-алгоритмічного забезпечення обробки реалізації вітчизняної мережної MRD технології траєкторних визначень.

Аналіз результатів експериментальних досліджень з метою оцінки точності запропонованої GPS/GNSS-технології траєкторних вимірювань. Рекомендації щодо підвищення точності та розвитку методів та GPS/GNSS технологій траєкторних вимірювань.

В ході обробки спостережень, отриманих на борті ПС і на базових станціях було усунуто фазові циклічні стрибки й проведено згладжування кодових спостережень за допомогою фазових відповідно до розробленої технології обробки спостережень. Обробка виконувалася для всіх «видимих» супутників (кут маскування = 10°) на всіх інтервалах спостережень.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки.

Контроль якості траєкторних спостережень, виконаних з використанням ПЗ GrafNav/GrafNet, показав, що для всіх проаналізованих трас польоту ПС отримані рішення із розрізненням фазової неоднозначності й з фазовими нев'язками на сантиметровому рівні точності. Це гарантувало якість оцінок параметрів руху ПС також на сантиметровому рівні точності, що цілком відповідає вимогам до еталонних вимірювань, та дає можливість верифікувати рішення з використання розробленої технології обробки траєкторних вимірювань.

Диференційний режим дозволяє значно (у кілька разів) підвищити точність координатних визначень порівняно з автономним позиціонуванням. Але стандартний диференційний режим не задовольняє заданим вимогам точності траєкторних вимірювань. При використанні ж згладжених кодових спостережень та мережних технологій диференційний режим може задовольнити вимоги щодо точності визначень у діапазоні віддалень ПС від базової станції 100-130 км. Так, за плановими координатами точкових (SPP) рішень отримані розбіжності (нев'язки) з еталонною траєкторією, що не перевищують 10-20 см (95%), а по висоті – 20-40 см.

Одержання еталонних траєкторій руху ПС (ПЗ «GrafNav/GrafNet»)

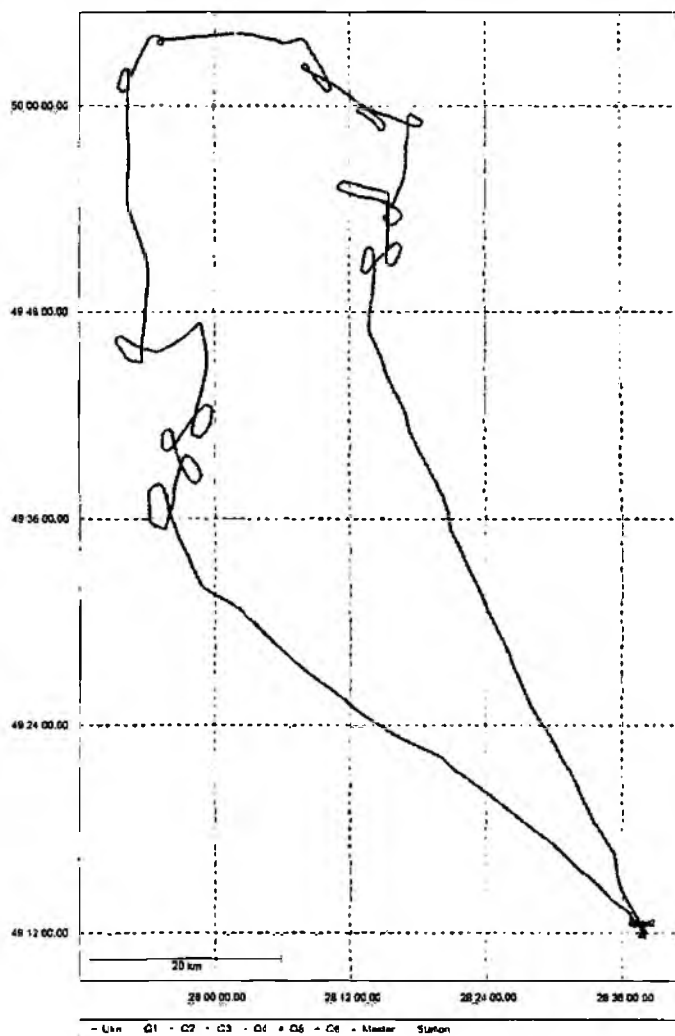


Рис. 1. Графічне зображення еталонної траєкторії (широта, довгота) ПС, отримане з використанням ПЗ «GrafNav/GrafNet»

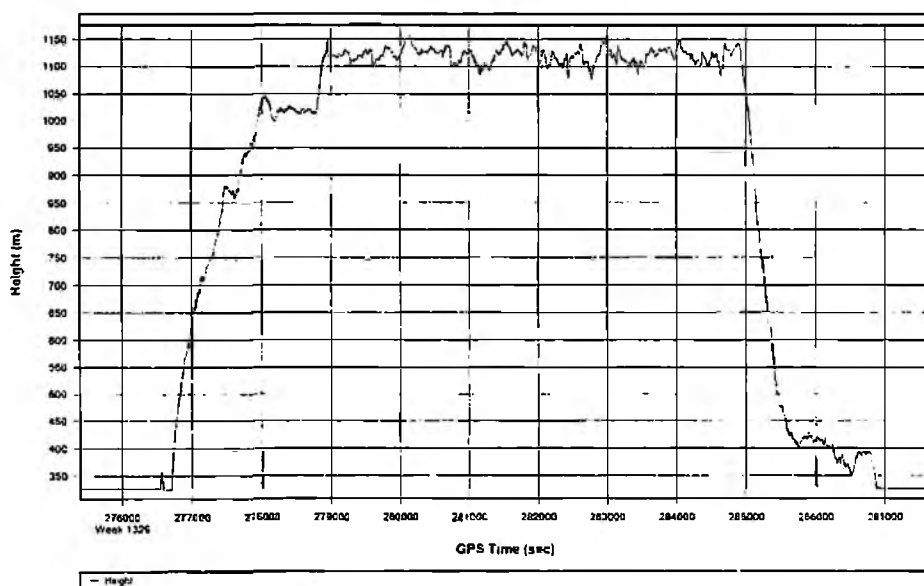


Рис. 2. Зміни висоти на всіх фазах руху ПС

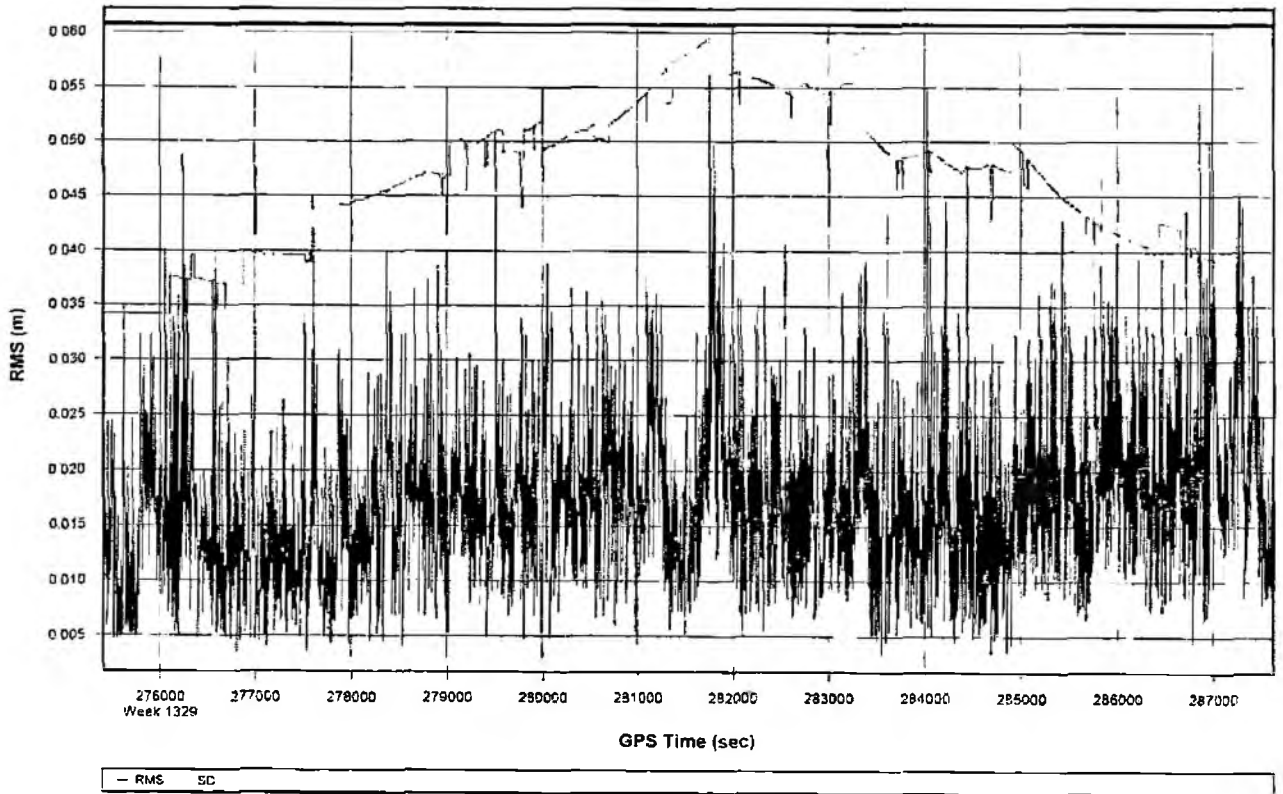


Рис. 3. Оцінка RMS еталонних параметрів траєкторії ПС, отриманих з використанням ПЗ «GrafNav/GrafNet»

Нев'язки рішення (ПЗ «ОСТАВА»), що перевіряється, та еталонного рішення

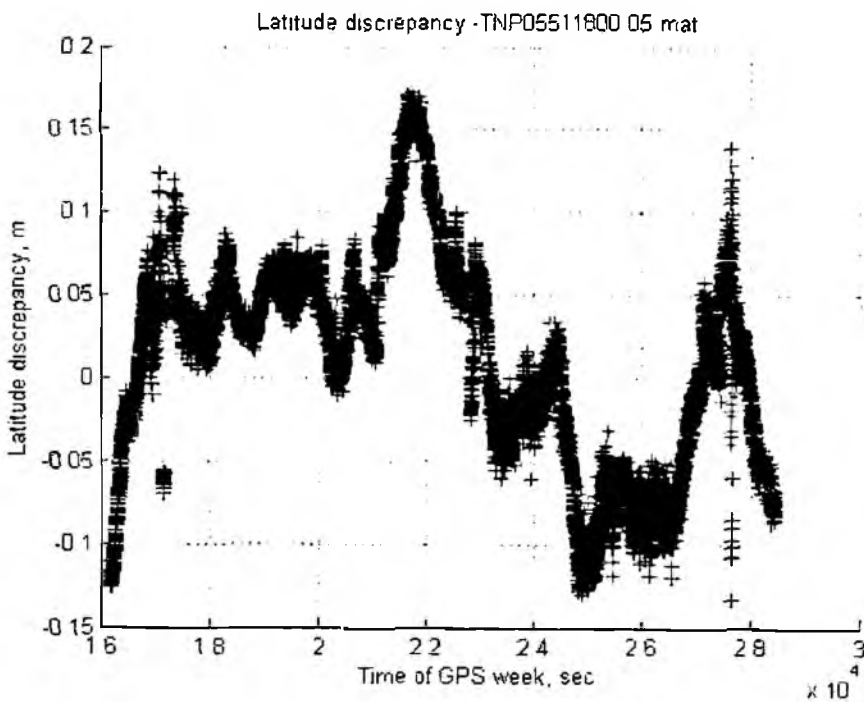


Рис. 4. Типові нев'язки за широтою (в метрах) результатів визначення траєкторії ПС, отриманої за допомогою ПЗ «GrafNav/GrafNet» і ПАЗ «ОСТАВА»

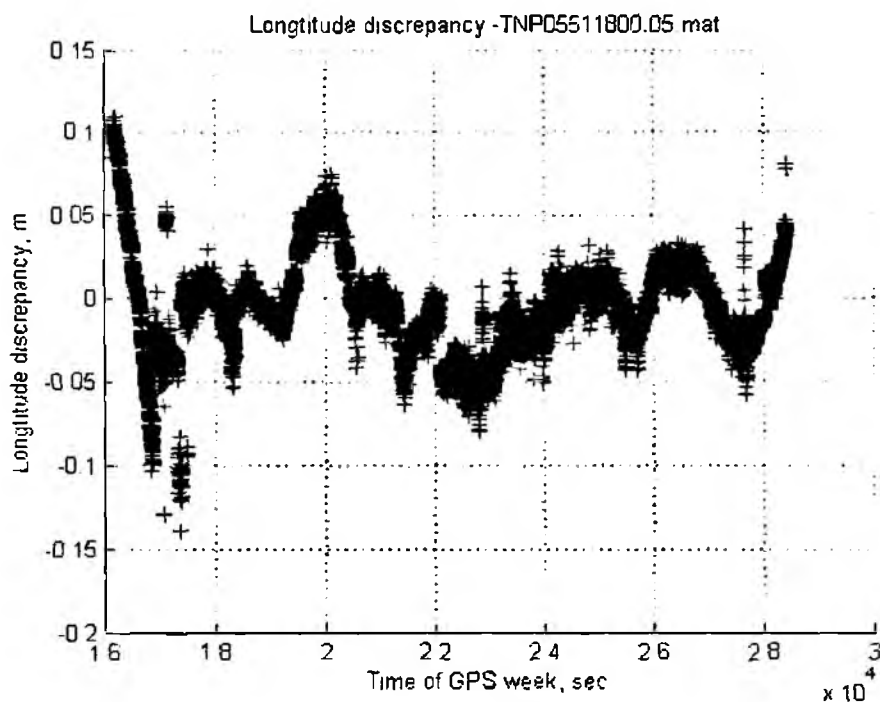


Рис. 5. Типові нев'язки за довготою (в метрах) результатів визначення траєкторії ПС, отриманої за допомогою ПЗ «GrafNav/GrafNet» і ПАЗ «ОСТАВА»

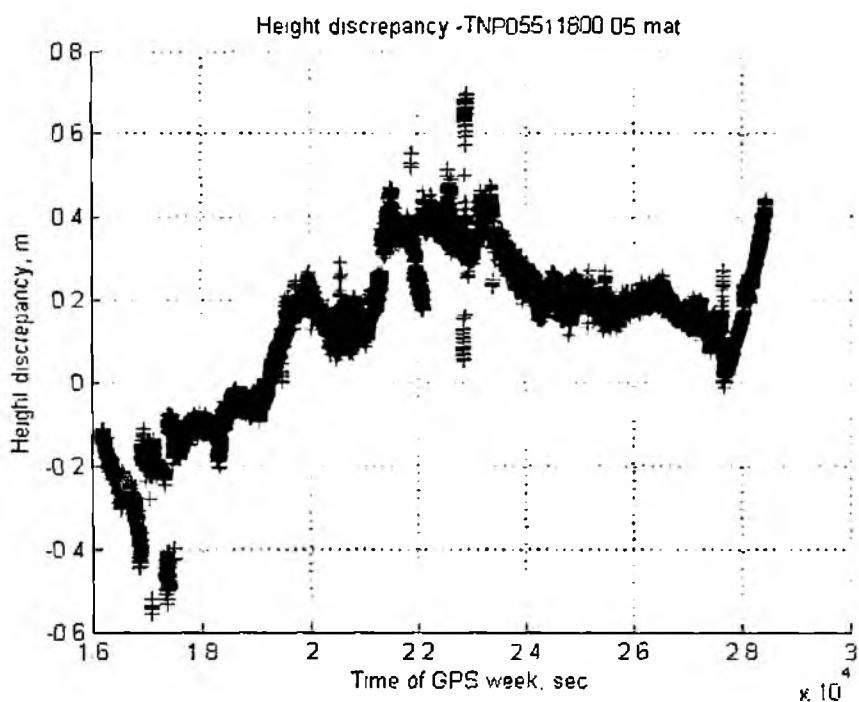


Рис. 6. Типові нев'язки за висотою (в метрах) результатів визначення траєкторії ПС, отриманої за допомогою ПЗ «GrafNav/GrafNet» і ПАЗ «ОСТАВА»

На даному етапі розробки технології траєкторних вимірювань було використано одночастотне диференційне рішення, а іоносферні корекції вводилися відповідно до моделі Клобушара з використанням коефіцієнтів, переданих GPS у складі даних альманаху. Очевидно, що можливе підвищення точності траєкторних вимірювань за рахунок використання двочастотних іоносферних корекцій. Можна очікувати, що подібна точність траєкторних вимірювань буде досягнута й на більших віддаленнях, – до 150-200 км. А це, у принципі, дозволяє у більшості випадків відмовитися від використання мобільних базових станцій і використовувати існуючі перманентні референційні станції України для льотних випробувань.

Доцільно ще й надалі розвивати організацію траєкторних вимірювань з використанням мультиреференційного способу, при якому відзначається підвищення точності й надійності визначень стосовно випадку стандартного диференційного режиму з використанням найближчої базової станції.

Висновки та рекомендації

В роботі отримано результати експериментальних досліджень алгоритмів супутникових траєкторних вимірювань з використанням диференційних корекцій за кодово-фазовими GPS-спостереженнями і доведено можливість досягнення на всій території України *дециметрової точності* координатних визначень при використанні кодово-фазових (згладжених) спостережень. Але можна поставити запитання, що обмежує точність траєкторних вимірювань, та як у подальших розробках і дослідженнях досягти субдециметрового або сантиметрового рівня точності. Виконані дослідження також дозволили виявити джерела похибок розробленого методу вимірювань та виявити резерви щодо підвищення точності. На даному етапі розробки технології траєкторних вимірювань було використано одночастотне диференційне рішення, а іоносферні корекції вводилися за моделлю Клобушара з використанням коефіцієнтів, переданих GPS у складі даних альманаху.

Очевидно, що можливе підвищення точності траєкторних вимірювань за рахунок використання двочастотних іоносферних корекцій. Принциповим обмеженням прийнятої схеми обробки є схема згладжування (фільтрації) кодових спостережень із використанням фазових. Ця технологія через багатопроменевість кодових спостережень помітно обмежує точність кінцевих координатних визначень. Для усунення цього ефекту доцільно в подальших розробках використовувати технології розрізнення фазової невизначеності, зокрема, вимірювань фази на різницевої частоті з довжиною хвилі ~ 86.4 см.

Іншими джерелами похибок траєкторних визначень, особливо на більших базових відстанях, є ефемеридні й тропосферні похибки. Для відбивання впливів цих похибок необхідно використовувати точні IGS орбіти й включати до складу оцінюваних параметрів залишкові (після модельної компенсації) тропосферні похибки вимірів з урахуванням того, що тропосферні затримки на борту ПС і на базовій станції істотно відрізняються через перепад висот.

Таким чином, в даній роботі представлені результати досліджень шляхів розробки й впровадження вітчизняних технологій траєкторних визначень для вирішення задач:

- високоточного траєкторного контролю руху ПС (в режимі пост-обробки) на всіх фазах польоту, зокрема, для цілей аерофотограмметрії;
- оцінки (атестації) і моніторингу реальних характеристик (точність, доступність, цілісність, неперервність) бортового й наземного аеронавігаційного устаткування, у тому числі й аеронавігаційного забезпечення за сигналами GPS/GNSS;
- забезпечення експериментів по відпрацюванню й аналізу нових польотних процедур заходу на посадку й посадки ПС.

Отримано результати експериментальних досліджень алгоритмів супутникових траєкторних вимірювань з використанням диференційних корекцій за кодово-фазовими GPS-спостереженнями референційних станцій і доведено можливість досягнення на всій території України *дециметрової точності* координатних визначень при використанні кодово-фазових (згладжених) спостережень. Так, за плановими координатами поточних точкових рішень

отримано розбіжності (нев'язки) з еталонною траєкторією, які не перевищують 10-20 см (95%) по плановим координатам, а по висоті – 20-40 см.

Розроблені рекомендації щодо підвищення точності та розвитку методів та GPS/GNSS-технологій траєкторних вимірювань.

Список літератури: 1. *Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика* / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтнеггер, Д. Коллінз; Пер. з англ. 3-го вид. за ред. Я.С. Яцківа. Київ: Наук. думка, 1995. 380 с. 2. *Марченко В.П., Жалило А.А., Конин В.В., Кондратюк В.М.* Зарубежный опыт создания и применения систем FIS (Fight Inspection Systems) для контроля характеристик и сертификации авионики и аэронавигационного обеспечения воздушных судов с использованием DGPS (DGNSS) підсистем // Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 26-28 квітня 2004 р. Т. 2. С. 21.1 – 21.9. 3. *Жалило А.А.* Методический подход и алгоритмы реализации дифференциального метода спутниковой навигации по наблюдениям сети контрольных станций // Космічна наука і технологія. НКА і НАН України. т. 5, №5/6. 1999. С. 33-44. 4. *Жалило А.А., Шелковенков Д.А., Шокало В.М.* Достижение дециметровой точности в режиме мультиреференцной дифференциальной навигации с использованием наблюдений перманентных референцных GPS-станций // Радиотехника: Всеукр. науч.-техн. сб. 2006. Вып. 145. С. 76-83. 5. *Zhalilo A., Shelkovenkov D.* Features and service performance of multifunctional software toolkit «OCTAVA» for processing and analysis of GPS/GNSS observations. // GEOS 2007 Conference Proceedings, Prague, Czech Republic. 1st – 2nd March 2007, p. 102-110.

*Харківський національний
університет радіоелектроніки*

Надійшла до редколегії 27.02.2008