

## ПОДВІЙНА ДИФЕРЕНЦІАЛЬНА КОРЕКЦІЯ РІЗНИЦЬ КОДОВИХ ПСЕВДОДАЛЬНОСТЕЙ ЗА НАВІГАЦІЙНИМИ КОСМІЧНИМИ АПАРАТАМИ. ТЕХНОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ Й ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ

*Розглянута подвійна диференціальна корекція різностей кодів псевдодальностей за навігаційними космічними апаратами, технологія формування й ефективність застосування. Надані основні рівняння корекції інформації. Коротко розглянуті імітаційні моделі мереж, які використовують чотири передаючих станції. Представлені основні дані й результати імітаційної моделі.*

### Постановка задачі

Супутникові радіонавігаційні системи GPS, ГЛОНАСС мають найкращі потенційні точнісні характеристики. Однак фактична точність оцінок вектора стану апаратури споживача є істотно гіршою через наявність повільнозмінюваних у часі та просторі систематичних похибок вихідних вимірювань, зокрема, вимірювань кодів псевдодальностей. З метою ослаблення таких похибок використовують радіоелектронні комплекси локальних, регіональних і широкозонних контрольних станцій.

Особливий інтерес викликають радіоелектронні комплекси регіональних контрольних станцій, оскільки вони дозволяють значно збільшити зону дії коригувальної інформації [1]. Ця обставина є особливо важливою для забезпечення дій авіації. При цьому мається на увазі не тільки вирішення завдання власне навігації в реальному масштабі часу, але й вирішення завдання високоточного координатно-часового забезпечення мобільних наземних радіотехнічних систем зв'язку й управління.

На теперішній час достатньо глибоко досліджена подвійна диференціальна корекція кодів псевдодальностей [2]. Великий практичний інтерес викликає подвійна диференціальна корекція перших різниць кодів псевдодальностей за навігаційними космічними апаратами. У даному випадку слід очікувати значного зниження похибок формування коригувальної інформації, обумовлених похибками шкал часу і частот опорних генераторів контрольних станцій. В апаратурі споживачів при обробці різниць кодів псевдодальностей за навігаційними космічними апаратами також фактично цілком виключається похибка, пов'язана з формуванням шкали часу.

Певним недоліком різницевої псевдодалекомірних і різницевої псевдошвидкісних вимірювань є наявність взаємної кореляції випадкових похибок вимірювань за різними парами космічних апаратів,

якщо ці пари використовують один загальний космічний апарат. Має місце також фактичне подвоєння дисперсій випадкових похибок вимірювань кожної різниці псевдодальностей. Нарешті, різницево-далекомірною технологією в середньому трохи погіршує геометричний фактор системи.

**Мета статті** – синтез алгоритму формування подвійної диференціальної корекції різниць кодів псевдодальностей за навігаційними космічними апаратами й аналіз ефективності застосування такої корекції в регіоні.

### Результати досліджень

Розглянемо радіоелектронний комплекс із чотирьох контрольних станцій (рис. 1). Тут наведені:

- головна контрольна станція (ГКС\_0);
- периферійні регіональні контрольні станції (РКС\_1, РКС\_2, РКС\_3);
- наземні пункти контролю якості коригувальної інформації (ПКЯ КІ);
- передавач поправок (ПРДП).

Периферійні регіональні контрольні станції пов'язані з головною контрольною станцією апаратури передачі даних. Формування коригувальної інформації передбачається на головній контрольній станції, у районі якої розташовується передавач цієї інформації споживачам.

Припустимо, що на кожній контрольній станції визначається повна похибка вимірювання різниць кодів псевдодальностей за обраними парами навігаційних космічних апаратів  $\nabla \bar{u}_{ik}$  ( $k = 1, 2, \dots, M$ ;  $t_{k+1} - t_k = \Delta t$ ).

Рівняння спостереження для контрольної станції з номером запишемо у вигляді

$$\nabla \bar{u}_{ik} = \delta \nabla \tilde{D}_{ik} + \nabla \bar{n}_{ik}^0, \quad (1)$$

де  $\delta \nabla \tilde{D}_{ik}$  – систематична повільнозмінювана по-

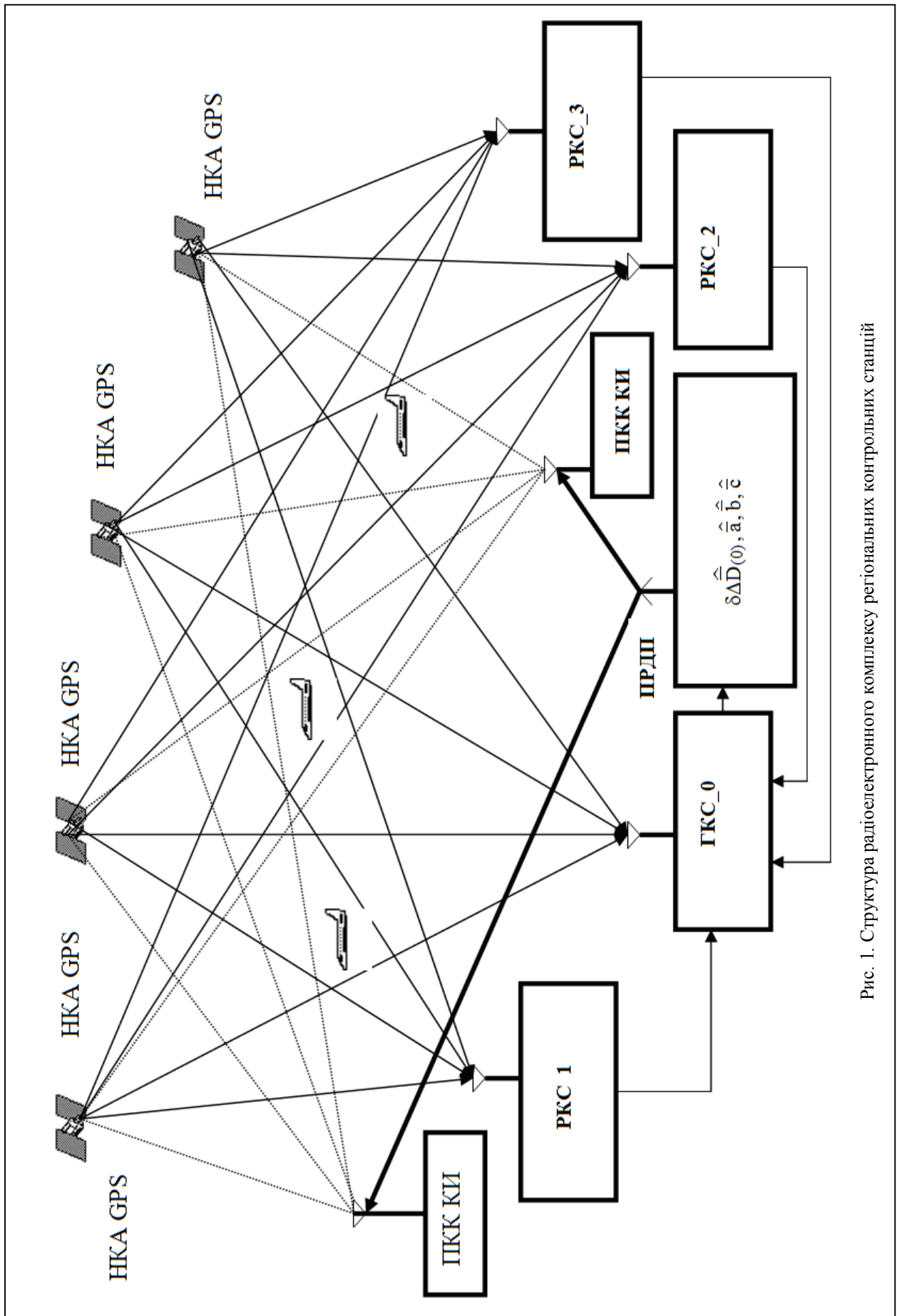


Рис. 1. Структура радіоелектронного комплексу регіональних контрольних станцій

хибка вимірювання різниць кодових псевдодальностей за навігаційними космічними апаратами,

$\overset{\circ}{\nabla} \tilde{\mathbf{p}}_{ik}$  – випадкова похибка вимірювання різниць кодових псевдодальностей за навігаційними космічними апаратами, причому

$$\delta \tilde{\nabla D}_{ik} = \begin{pmatrix} \delta \tilde{\nabla D}_{ik21} \\ \delta \tilde{\nabla D}_{ik31} \\ \delta \tilde{\nabla D}_{ik41} \end{pmatrix}, \quad (k = 1, 2, \dots, M).$$

Тут припускається, що в наявності є чотири навігаційних космічних апарати, а космічний апарат з номером 1 обраний загальним при проведенні вимірювань.

Для формування коригувальної інформації, наприклад, для однієї пари космічних апаратів складемо вектор різниць за контрольними станціями:

$$\Delta \nabla \tilde{\mathbf{u}}_k = \Delta \delta \tilde{\nabla D}_k + \Delta \nabla \tilde{\mathbf{p}}_k, \quad (2)$$

$$\text{де } \Delta \nabla \tilde{\mathbf{u}}_k = \begin{pmatrix} \nabla \mathbf{u}_{k1} - \nabla \mathbf{u}_{k0} \\ \nabla \mathbf{u}_{k2} - \nabla \mathbf{u}_{k0} \\ \nabla \mathbf{u}_{k3} - \nabla \mathbf{u}_{k0} \end{pmatrix};$$

$$\Delta \delta \tilde{\nabla D}_{ik} = \begin{pmatrix} \delta \tilde{\nabla D}_{k1} - \Delta \delta \tilde{\nabla D}_{k0} \\ \delta \tilde{\nabla D}_{k2} - \Delta \delta \tilde{\nabla D}_{k0} \\ \delta \tilde{\nabla D}_{k3} - \Delta \delta \tilde{\nabla D}_{k0} \end{pmatrix}.$$

Вектор  $\Delta \nabla \tilde{\mathbf{p}}_k$  характеризується нульовим математичним сподіванням і дисперсійно-коваріаційною матрицею  $\Delta \nabla \underline{\mathbf{N}}_k$ , яка, зокрема, може вважатися постійною на порівняно невеликому інтервалі часу спостереження.

Основна гіпотеза регіональної корекції полягає в припущенні, що просторове поле систематичних похибок в околі головної контрольної станції з координатами  $x_0, y_0, z_0$  є лінійним, і допускає представлення

$$\Delta \delta \tilde{\nabla D}_k = \underline{\mathbf{C}} \cdot \tilde{\boldsymbol{\lambda}}_k,$$

$$\text{де } \underline{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 \end{bmatrix};$$

$$\tilde{\boldsymbol{\lambda}}_k = (a_k, b_k, c_k).$$

З урахуванням повільного характеру змін у часі систематичних похибок припустимо, що

$$\tilde{\boldsymbol{\lambda}}_k = \tilde{\boldsymbol{\lambda}} = \text{const}(k)$$

на порівняно невеликому інтервалі часу спостереження ( $k = 1, 2, \dots, M$ ).

Задача фактично зводиться до оцінки вектора  $\tilde{\boldsymbol{\lambda}}_k$  за спостереженнями  $\Delta \nabla \tilde{\mathbf{u}}_k$ . Для розв'язання даної задачі можна використовувати метод максимальної правдоподібності з обробкою або повної вибірки спостережень, або за вибіркою наростаючого обсягу.

Формування і застосування коригувальної інформації. З використанням методу максимальної правдоподібності можна одержати вираз для оцінки вектора  $\tilde{\boldsymbol{\lambda}}_k$  на поточний момент часу:

$$\tilde{\boldsymbol{\lambda}}_k = \left[ \underline{\mathbf{C}}^T \cdot \Delta \nabla \underline{\mathbf{N}}_k^{-1} \cdot \underline{\mathbf{C}} \right]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{C}}^T \cdot \Delta \nabla \underline{\mathbf{N}}_k^{-1} \cdot \Delta \nabla \tilde{\mathbf{u}}_k. \quad (3)$$

Точність такої оцінки характеризується матрицею

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}} = \left[ \underline{\mathbf{C}}^T \cdot \Delta \nabla \underline{\mathbf{N}}_k^{-1} \cdot \underline{\mathbf{C}} \right]^{-1}. \quad (4)$$

При квадратній і неособливій матриці  $\underline{\mathbf{C}}$  маємо

$$\hat{\boldsymbol{\lambda}}_k = \underline{\mathbf{C}}^{-1} \cdot \Delta \nabla \tilde{\mathbf{u}}_k; \quad \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_k = \underline{\mathbf{C}}^{-1} \cdot \Delta \nabla \underline{\mathbf{N}}_k \cdot \underline{\mathbf{C}}^{-1T}. \quad (5)$$

Якщо  $\tilde{\boldsymbol{\lambda}}_k = \tilde{\boldsymbol{\lambda}} = \text{const}(k)$ , то

$$\hat{\boldsymbol{\lambda}} = \left[ \sum_{k=1}^M \underline{\mathbf{C}}^T \cdot \Delta \nabla \underline{\mathbf{N}}_k^{-1} \cdot \underline{\mathbf{C}} \right]^{-1} \cdot \sum_{k=1}^M \underline{\mathbf{C}}^T \cdot \Delta \nabla \underline{\mathbf{N}}_k^{-1} \cdot \Delta \nabla \tilde{\mathbf{u}}_k; \quad (6)$$

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_k = \left[ \sum_{k=1}^M \underline{\mathbf{C}}^T \cdot \Delta \nabla \underline{\mathbf{N}}_k^{-1} \cdot \underline{\mathbf{C}} \right]^{-1}. \quad (7)$$

Нарешті, якщо  $\Delta \nabla \underline{\mathbf{N}}_k = \Delta \nabla \underline{\mathbf{N}}$ , то

$$\hat{\boldsymbol{\lambda}} = \left[ \underline{\mathbf{C}}^T \cdot \Delta \nabla \underline{\mathbf{N}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{C}} \right]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{C}}^T \cdot \Delta \nabla \underline{\mathbf{N}}^{-1} \cdot \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \Delta \nabla \tilde{\mathbf{u}}_k; \quad (8)$$

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}} = \frac{1}{M} \cdot \underline{\mathbf{C}}^{-1} \cdot \Delta \nabla \underline{\mathbf{N}} \cdot \underline{\mathbf{C}}^{-1T}. \quad (9)$$

Коригувальна інформація з конкретної пари навігаційних космічних апаратів представляється вектором  $\hat{\boldsymbol{\lambda}} = (\hat{a}, \hat{b}, \hat{c})$  і похибкою  $\nabla \mathbf{u}_{k0}$ , яка виміряна на головній контрольній станції.

В апаратурі споживача з номером  $\alpha$  за даною інформацією формується подвійна корекція вигляду

$$\begin{aligned} dd \tilde{\nabla D}_{k\alpha} &= \nabla \mathbf{u}_{k0} + \hat{a} \cdot (x_\alpha - x_0) + \\ &+ \hat{b} \cdot (y_\alpha - y_0) + \hat{c} \cdot (z_\alpha - z_0) = \\ &= \nabla \mathbf{u}_{k0} + d \tilde{\nabla D}_\alpha = dU0 + ddD = \text{DoubleCor}, \end{aligned}$$

де  $x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha$  – наближені координати антени споживача.

Для оцінки ефективності застосування подвійної диференціальної корекції різниць кодових псевдодальностей за навігаційними космічними апаратами можна використовувати вираз для залишкової похибки

$$dU\alpha - \text{DoubleCor} = dU\alpha - dU0 - ddD.$$

Вираз  $dU\alpha - dU0$  характеризує залишкову похибку при використанні одинарної корекції за даними тільки головної контрольної станції. З метою ослаблення випадкових похибок необхідно використовувати оцінки  $\delta V\tilde{D}_{k\alpha}$ ,  $\delta V\tilde{D}_{k0}$ , отримані на основі поліноміального віконного згладжування спостережень  $Vu_{k\alpha} = dU\alpha$ ,  $Vu_{k0} = dU0$ .

Структура імітаційної моделі радіоелектронного комплексу регіональних контрольних станцій. Імітаційна модель радіоелектронного комплексу регіональних контрольних станцій включає [2]:

імітаційну модель регіональної контрольної станції (PKC) пункту контролю якості коригувальної інформації (ПКЯ KI);

імітаційну модель Центра збору й обробки вимірювальної інформації.

Імітаційна модель PKC, ПКЯ KI містить:

модуль планування сеансу зв'язку і розрахунку ефемерид чотирьох робочих навігаційних космічних апаратів GPS у межах сеансу зв'язку з заданою дискретністю в часі;

модуль розрахунку геометричних дальностей і швидкостей, модуль формування частотно-часових розбіжностей із заданими статистичними характеристиками;

модуль розрахунку псевдодальностей і псевдошвидкостей або їх різниць за навігаційними космічними апаратами;

модуль розрахунку повільнозмінюваних похибок вимірювання псевдодальностей і псевдошвидкостей, обумовлених тропосферною, іоносферною рефракцією, похибками в знанні восьмивимірних векторів стану робочих навігаційних космічних апаратів (НКА);

модуль формування випадкових похибок вимірювань псевдодальностей і псевдошвидкостей із заданими статистичними характеристиками;

модуль формування псевдодальностей і псевдошвидкостей, що спостерігаються, або перших різностей по НКА псевдодальностей і псевдошвидкостей.

Імітаційна модель Центра збору й обробки вимірювальної інформації містить:

модуль розрахунку коефіцієнтів лінійного відрізка ряду Тейлора для полів повних похибок вимірювань різниць кодів псевдодальностей за НКА (для кожної пари НКА) за даними регіональних контрольних станцій;

модуль розрахунку подвійної диференціальної корекції різниць кодів псевдодальностей за НКА (для кожної пари НКА) для декількох пунктів контролю якості коригувальної інформації;

модуль розрахунку залишкових похибок у вимірюваннях різниць кодів псевдодальностей за НКА (для кожної пари НКА) за даними комплексу контрольних станцій і за даними тільки головної контрольної станції.

Вихідні дані й основні результати імітаційного моделювання радіоелектронного комплексу регіональних контрольних станцій. Головна контрольна станція (PKC\_0) обрана в районі Хмельницького (рис. 2).

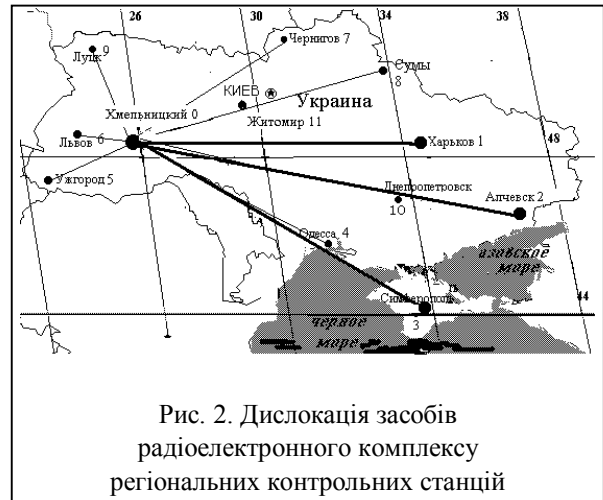


Рис. 2. Дислокація засобів радіоелектронного комплексу регіональних контрольних станцій

Периферійні контрольні станції розташовані в Харкові (PKC\_1), Алчевську (PKC\_2) та Сімферополі (PKC\_3). Пункти контролю якості коригувальної інформації розташовані в Одесі (ПКЯ KI\_4), Ужгороді (ПКЯ KI\_5), Львові (ПКЯ KI\_6), Чернігові (ПКЯ KI\_7), Сумах (ПКЯ KI\_8), Луцьку (ПКЯ KI\_9), Дніпропетровську (ПКЯ KI\_10), Житомирі (ПКЯ KI\_11). Для моделювання комплексу обраний сеанс 20.04.2005 з 8:00:00 до 8:02:00 UTC. Робітники НКА GPS обрані з номерами 15, 16, 26, 19 (рис. 3). На 8:00:00 UTC для головної контрольної станції кути підвищення НКА склали 84°, 36°, 27°, 18° відповідно.

На інтервалі спостереження тривалістю 120 с спостереження проводилися з дискретністю 1 с. Середньоквадратичні похибки вимірювання кодів псевдодальностей і фазових псевдошвидкостей припускались на рівні 0,3 м і 0,01 м/с. При розрахунку повільнозмінюваних похибок використані стандартні моделі атмосферної рефракції, типові значення похибок знання векторів стану робітників НКА.

У табл. 1 наведені середні оцінки параметрів лінійної апроксимації просторових полів різниць кодів псевдодальностей за навігаційними космічними апаратами в околі головної контрольної станції за сеанс тривалістю 120 секунд. Також наведені їх середньоквадратичні похибки в метрах на 100 кілометрів.

Таблиця 1

Середні за сеанс оцінки параметрів апроксимації просторових полів погрешностей вимірювань різниць кодових псевдодальностей за навігаційними космічними апаратами та їх середньоквадратичні похибки

Пари НКА	15 – 16		15 – 19		15 – 26	
	a (м /100 км)	СКО_a	b (м /100 км)	СКО_b	c (м /100 км)	СКО_c
15 – 16	2,02	0,184	1,1	0,118	2,2	0,245
15 – 19	2,1	0,187	0,92	0,12	2,88	0,249
15 – 26	1,09	0,139	1,18	0,089	2,17	0,185

Таблиця 2

Середні за сеанс повні (без корекції) і залишкові (після подвійної корекції) погрешності (м) вимірювань різниць кодових псевдодальностей за навігаційними космічними апаратами

ПКЯ КІ	15 – 16		15 – 19		15 – 26	
	dD $\alpha$	dD $\alpha$ – DoubleCor	dU $\alpha$	dU $\alpha$ – DoubleCor	dD $\alpha$	dD $\alpha$ – DoubleCor
Одеса	-1,2	-0,22	-1,05	-0,13	-4,52	-0,15
Чернігів	-2,65	0,08	-0,6	-0,12	-2,58	0,21
Суми	-3,0	-0,26	-0,8	-0,09	-2,25	-0,04
Дніпропетровськ	-2,11	-0,41	-1,21	-0,24	-3,1	-0,16
Житомир	-1,66	0,104	-0,16	-0,11	-3,99	0,12

У табл. 2 наведені середні за сеанс повні і залишкові похибки вимірювання різниць кодових псевдодальностей за навігаційними космічними апаратами у п'ятих пунктах контролю якості коригувальної інформації.

З метою наочності основних результатів іміта-

ційного моделювання радіоелектронного комплексу регіональних контрольних станцій на рис. 4 – 6 наведені залежності в часі та залишкових похибок вимірювання різниць кодових псевдодальностей за навігаційними космічними апаратами для пункту контролю якості коригувальної інформації в Чернігові при одинарній і подвійній корекції.

На рис. 7 наведені залежності від часу вихідних даних і результатів подвійної диференціальної корек-

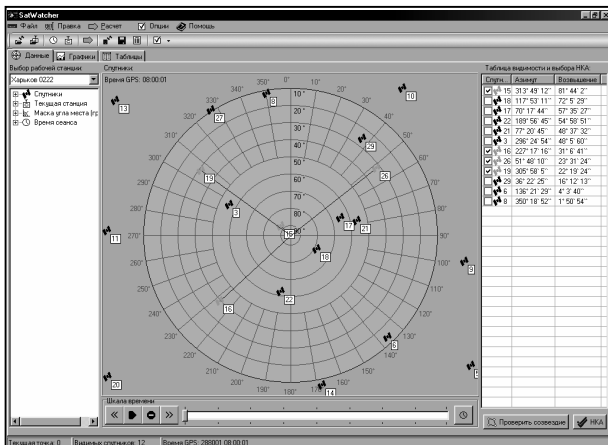


Рис. 3. Навігаційна обстановка на 8:00:00 UTC

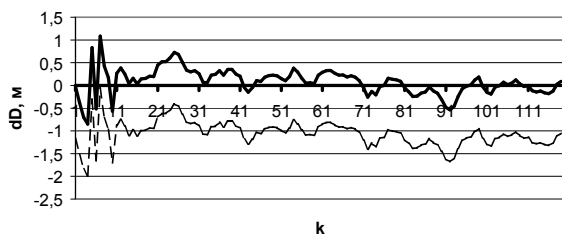


Рис. 4. Залишкові похибки НКА 15-16 (пунктирна лінія – dU7 – dU0; сплошна – dU7 – DoubleCor)

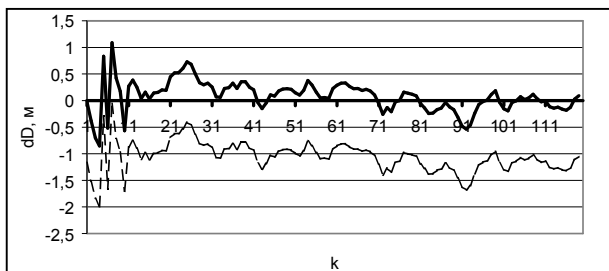


Рис. 5. Залишкові похибки НКА 15 – 19 (пунктирна лінія – dU0 – dU4; сплошна – dU0 – DoubleCor)

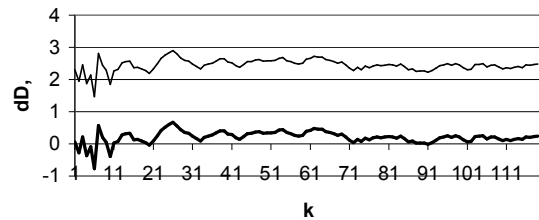
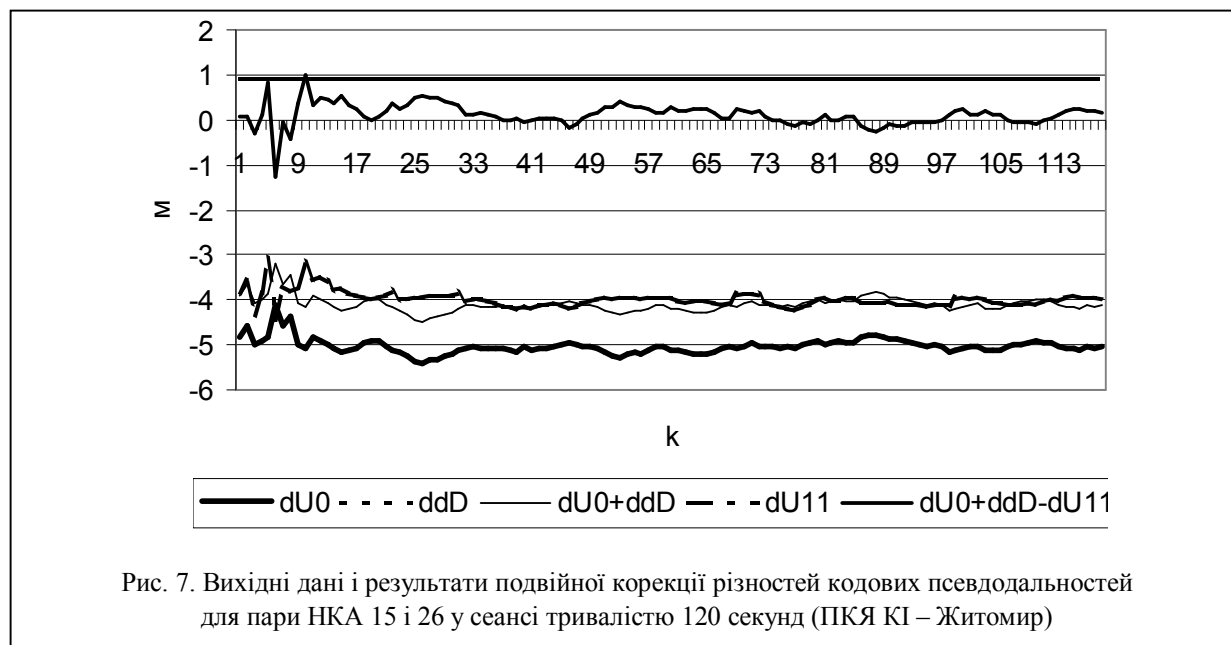


Рис. 6. Залишкові похибки для НКА 15 – 26 (пунктирна лінія – dU7 – dU0; сплошна – dU7 – DoubleCor)



кції різниць кодових псевдодальностей для пари НКА 15 та 26 у Житомирі.

### Висновки

1. Подвійна диференціальна корекція різниць кодових псевдодальностей за парами навігаційних космічних апаратів необхідна для компенсації систематичних похибок вимірювання в апаратурі споживачів супутникових радіонавігаційних систем при оцінках їх координат, а в загальному випадку і швидкостей.

2. У межах сеансу тривалістю 120 секунд параметри лінійної апроксимації просторового поля похибок вимірювання різниць кодових псевдодальностей за парами навігаційних космічних апаратів можуть припускатися постійними при кутах підвищення НКА над горизонтом вище  $15^\circ$ .

3. Подвійна диференціальна корекція різниць кодових псевдодальностей за парами навігаційних космічних апаратів у 5 – 10 разів зменшує похибку таких вимірювань (табл. 2).

4. Подвійна диференціальна корекція різниць ко-

дових псевдодальностей за парами навігаційних космічних апаратів істотно краще одинарної корекції за даними тільки головної контрольної станції (рис. 4 – 6). Аналогічні результати отримані і в інших пунктах контролю якості коригувальної інформації.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Наумова Е.Э., Романько В.Н., Черепков С.Т., Хомяков Э.Н. Метод двойной дифференциальной коррекции // Украинский метрологический журнал. – 1999. – № 3. – С. 8 – 10.
2. Хомяков Э.Н., Наумова Е.Э. Глобальные навигационные спутниковые системы. Радиотехнические комплексы региональных контрольных станций: Учеб. пособ. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2003. – 109 с.

Надійшла 25.01.2006

Рецензент: д-р техн. наук професор П.Ю. Костенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба.