

УДК 621.396.96+629.783

DOI: <http://doi.org/10.20535/2219-3804212019195851>

Л. С. Беляєвський¹, професор, д.т.н., Г. Л. Баранов², професор, д.т.н.,
А. А. Сердюк³, доцент, к.т.н., Є. О. Топольськов⁴, доцент, к.т.н.

УДОСКОНАЛЕННЯ БОРТОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІНЕРЦІАЛЬНИХ ДАТЧИКІВ ТА ІМОВІРНІСНО-ГЕОМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

En

Providing high accuracy of the coordinates and trajectories of objects by measurements conducted in navigation systems and complexes is an urgent task, which improves safety and efficiency of different modes of transport. However difficult environmental conditions, where vehicles are commonly used, stipulate influence of different factors on performance of onboard satellite navigation receivers, which are used as basic navigation devices for ground vehicle nowadays. Setting on cars used for common purposes additional navigation devices, which provide better performance, in most cases is economically unreasonable.

Economically reasonable ways to improve onboard navigation complexes of vehicles, which are used for common purposes, are examined in this article. Functional diagram and principles of work of navigational complex, which uses the satellite navigation receiver and simplified variant of inertial navigation system is pointed as well.

Also, the justification of methods for minimizing the error formats of coordinates and trajectories of moving objects based on information processing in multipositional, in particular satellite-inertial navigation systems and complexes, is presented.

The obtained research results give an opportunity to develop an algorithm for coordinate refinement, which can be implemented in the improved on-board navigational complex of vehicle.

Ru

Рассматриваются экономически выгодные пути усовершенствования бортовых навигационных систем автотранспортных средств общего назначения, приводится функциональная схема и принципы работы комплексной навигационной системы, использующей приемник спутниковых навигационных систем и упрощенный вариант инерциальной навигационной системы.

Полученные результаты исследований позволяют разработать алгоритм

¹ Транспортна академія України

² Національний транспортний університет

³ КПІ ім. Ігоря Сікорського

⁴ Національний транспортний університет

уточнення координат, который может быть реализован в усовершенствованном бортовом навигационном комплексе автотранспортного средства.

Вступ

Останніми роками спостерігається зростання зацікавленості у широкому застосуванні навігаційних систем автомобільного транспорту, що використовують глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС). Велике різноманіття приймачів сигналів ГНСС активно встановлюється на автотранспортні засоби (АТЗ) для особистих потреб і відпочинку, а також для вирішення комерційно-логістичних задач та під час управління громадським транспортом. На сьогоднішній день переважна більшість АТЗ використовують лише технологію супутникової навігації, яка має певні обмеження та проблеми під час експлуатації супутникових приймачів у несприятливих для радіонавігації умовах. Особливо це проявляється у разі проведення моніторингу руху автотранспортних засобів у міських умовах, у разі руху автомобілів у тунелях, районах із висотною забудовою, або просто у щільному транспортному потоці. Періодична втрата сигналів навігаційних супутників або багатопроменева їх поширення, що викликані впливом внутрішніх (у самій навігаційній системі) та зовнішніх факторів (природних перешкод або навмисно створюваних завад) призводить до неточного визначення навігаційних параметрів автотранспортних засобів або взагалі неможливості їх визначення. У зв'язку із цим виникає необхідність удосконалення навігаційних систем автотранспортних засобів шляхом створення бортових навігаційних комплексів, що використовують окрім приймачів сигналів ГНСС додаткові апаратні засоби, зокрема механічні, акустичні та оптичні датчики, а також інерціальні навігаційні системи (ІНС).

Постановка задачі

Багато ІТ компаній разом із конструкторськими бюро автовиробників, почали розробку та випробовування складних бортових навігаційних комплексів, які забезпечують не тільки високоточне та безперебійне місцевизначення АТЗ, а ще й можливість автоматичного керування їх рухом у складних експлуатаційних умовах. Проте вартість практичної реалізації та надійність функціонування таких систем у найближчій перспективі не дозволять розпочати їх серійне виробництво та встановлення на АТЗ загального призначення. Тому важливою практичною задачею є пошук економічно вигідних шляхів удосконалення бортових навігаційних систем АТЗ, що використовуються населенням у повсякденних задачах.

Шляхи вирішення проблеми

Першим напрямком забезпечення високоточної навігації для АТЗ, що не потребує значних економічних витрат, є застосування удосконаленого варіанту диференціального режиму, який був раніше запропонований авторами [1, 2]. Це гарантовано дозволяє зменшити похибки визначення координат автотранспортних засобів до 3 – 4 м. у разі оптимальної геометрії розташування супутників (робоче сузір'я із 5 – 6 супутників та $HDOP < 2$) порівняно із похибками 10 – 20 м. у номінальному режимі. Єдиною додатковою вимогою по відношенню до звичайного варіанту навігаційної системи АТЗ, що працює у номінальному режимі, є наявність двостороннього *online* каналу із опорною станцією диференціального режиму. Враховуючи достатнє покриття та високу пропускну здатність сучасних 3G/4G мереж стільникового зв'язку, ця умова є абсолютно прийнятною і може бути легко реалізована для великої кількості АТЗ.

Другим напрямком є використання удосконалених методів та алгоритмів комплексної обробки надлишкової навігаційної інформації, що отримується від додаткових робочих сузір'їв навігаційних супутників ГНСС та додаткових навігаційних пристроїв АТЗ, наприклад, ІНС. Враховуючи можливості сучасних інтегрованих приймачів сигналів ГНСС працювати одночасно із декількома сузір'ями супутників різних систем, цей напрямок є дуже важливим та актуальним. Авторами публікації розроблено удосконалений імовірно-геометричний метод та відповідні алгоритми обробки навігаційної інформації [4 - 6], що забезпечують суттєве зниження слабкорельованих складових похибок навігаційних вимірювань координат АТЗ. Даний метод дозволяє отримати результати на рівні калмановської фільтрації, але із значно меншими обчислювальними витратами і вищою стабільністю роботи [7]. Застосування розробленого методу стане особливо актуальним, коли будуть повністю введені у експлуатацію перспективні ГНСС *Galileo* та *Compass*. Це дасть можливість використовувати для навігаційних визначень одночасно 4 - 8 сузір'їв навігаційних супутників з декількох ГНСС.

Однак використання ефективних методів та алгоритмів обробки великої кількості навігаційних вимірювань від множини сузір'їв навігаційних орієнтирів також може бути недостатньо ефективним у експлуатаційних умовах із регулярним екрануванням (затінненням) радіосигналів. Тому важливою задачею є створення економічно вигідного бортового навігаційного комплексу АТЗ, що включає сучасний приймач ГНСС та ІНС. У такій системі навігація здійснюється на основі сигналів, що отримуються від датчиків транспортного засобу (одометрів, колісних датчиків антиблокувальної системи (АБС), гіроскопів і акселерометрів), а також даних ГНСС про місце розташування, швидкість і час, які в умовах стійкого ра-

діозв'язку із навігаційними супутниками використовуються для уточнення параметрів ІНС.

Хоча бортовий навігаційний комплекс ГНСС+ІНС і вирішує основну проблему звичайної навігаційної системи АТЗ, яка використовує тільки приймач ГНСС, але постає питання забезпечення надійності функціонування ІНС та її економічної доцільності. Вартість високоточних та надійних інерційних датчиків (прецизійних гіроскопів), які використовуються, наприклад, у авіації, неприйнятна для їх широкого застосування на АТЗ загального призначення, а точність та надійність роботи дешевих датчиків є недостатньою високою. Тому у більшості випадків обробка сигналів від колісних датчиків (одометрів) і акселерометрів АТЗ, що входять до складу системи АБС сучасних АТЗ, є єдиним економічно вигідним і достатньо точним способом визначення навігаційних параметрів наряду із застосуванням приймача ГНСС.

Питання зниження вартості ІНС вирішується шляхом відмови від дорогих прецизійних гіроскопів та застосування методики визначення спрямовуючого кута АТЗ за даними бортового приймача ГНСС, а також приросту цього кута за даними двох акселерометрів та колісних датчиків АТЗ. Функціональна схема такого навігаційного комплексу зображена на рис. 1.

Функціонування такого бортового навігаційного комплексу можна описати наступним чином.

Після запуску апаратури навігаційної системи у ній починають визначатись координати поточного положення АТЗ за допомогою приймача ГНСС (блок 7) та наближені прирости координат у квазіодометричному каналі (КОК) (блок 17), які потім уточнюються за результатами порівняння модулів радіус-векторів (R) і спрямовуючих кутів (α) радіус-векторів від КОК і приймача ГНСС (блоки 10 і 11).

Вихідні сигнали перетворювача радіальних координат у прирости планових координат (блок 16) мають вигляд:

$$\Delta X = R \cos \alpha_R, \quad \Delta Y = R \sin \alpha_R.$$

Вихідні сигнали блоків введення виправлень і корегування 10 та 11 мають вигляд:

$$R = R_{\text{КОК}} k, \quad \alpha = \alpha_{R\text{КОК}} + \Delta \alpha.$$

Вихідні сигнали блоків порівняння параметрів 8 та 9 мають вигляд:

$$k = \frac{R_{\text{ГНСС}}}{R_{\text{КОК}}}, \quad \Delta \alpha = \alpha_{R\text{ГНСС}} - \alpha_{R\text{КОК}}.$$

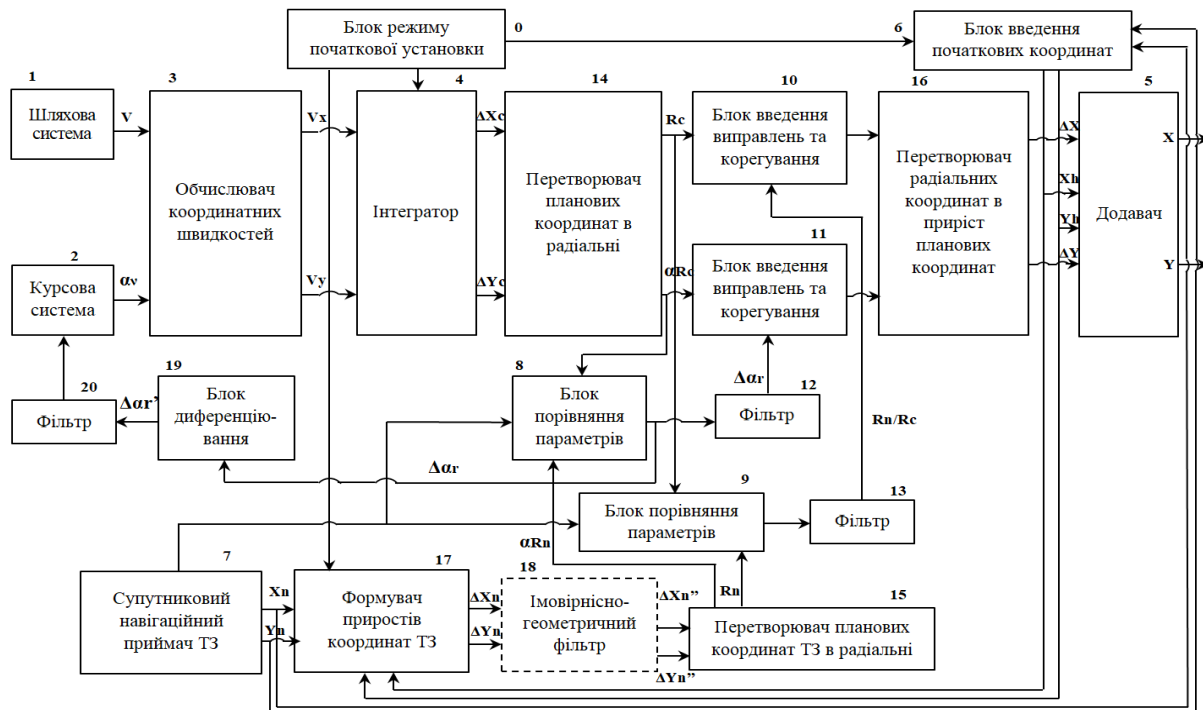


Рис. 1. Схема комплексної навігаційної системи, що використовує приймач ГНСС і спрощену ІНС

Вихідні сигнали перетворювачів планових координат у радіальні 14 і 15 мають вигляд:

$$R_{\text{КОК}} = \sqrt{\Delta X_{\text{КОК}}^2 + \Delta Y_{\text{КОК}}^2}, \quad \alpha_{R_{\text{КОК}}} = \arctg \frac{\Delta X_{\text{КОК}}}{\Delta Y_{\text{КОК}}},$$

$$R_{\text{ГНСС}} = \sqrt{\Delta X_{\text{ГНСС}}^2 + \Delta Y_{\text{ГНСС}}^2}, \quad \alpha_{R_{\text{ГНСС}}} = \arctg \frac{\Delta X_{\text{ГНСС}}}{\Delta Y_{\text{ГНСС}}}.$$

За нормальних умов поширення радіосигналу навігаційних супутників для позиціонування АТЗ використовується приймач сигналів ГНСС. У разі втрати сигналів навігаційних супутників або зниженні точності місцевизначення АТЗ блоки порівняння параметрів 8 та 9 блокуються і в блоках введення виправлень і корегування 10 та 11 залишаються останні значення k і $\Delta \alpha$. Із цього моменту вихідні координати АТЗ вимірюються КОК. Оскільки у КОК використовуються неточне значення початкового спрямовуючого кута, що апріорно закладається у пам'ять блоку 0, то виправлення до нього зменшує його похибку.

Для вимірювання приросту спрямовуючого кута використовується той факт, що під час руху по криволінійній траєкторії кожна точка АТЗ рухається по траєкторії, зберігаючи певну кутову швидкість поворотання АТЗ:

$$\omega_{\text{АТЗ}} \approx \frac{V}{R_{\text{тр}}} = \frac{V}{\sqrt{(R_{\text{ЦО}} + \Delta R_{\text{ДШ}})^2 + I_{\text{ДШ}}^2}},$$

де $R_{\text{ЦО}}$ – радіус кривизни траси для центру поворотання АТЗ,

$\Delta R_{\text{ДШ}}, I_{\text{ДШ}}$ – віддаль датчиків швидкості від центру поворотання уздовж і поперек $R_{\text{ЦО}}$,

$R_{\text{тр}}$ – радіус кривизни траєкторії АТЗ.

Різниця показів двох датчиків швидкості 16 і 17, встановлених у різних точках АТЗ дорівнює:

$$\begin{aligned} V_1 - V_2 &\approx \omega_{\text{АТЗ}} \left[\sqrt{(R_{\text{ЦО}} + \Delta R_1)^2 + I_1^2} + \sqrt{(R_{\text{ЦО}} + \Delta R_2)^2 + I_2^2} \right] = \\ &= \omega_{\text{АТЗ}} \left[R_{\text{ЦО}} \sqrt{1 + 2 \frac{\Delta R_1}{R_{\text{ЦО}}} + \frac{\Delta R_1^2 + I_1^2}{R_{\text{ЦО}}^2}} - R_{\text{ЦО}} \sqrt{1 + 2 \frac{\Delta R_2}{R_{\text{ЦО}}} + \frac{\Delta R_2^2 + I_2^2}{R_{\text{ЦО}}^2}} \right] = \\ &= \omega_{\text{АТЗ}} \left[R_{\text{ЦО}} + \Delta R_1 + \frac{\Delta R_1^2 + I_1^2}{2R_{\text{ЦО}}^2} - R_{\text{ЦО}} - \Delta R_2 - \frac{\Delta R_2^2 + I_2^2}{R_{\text{ЦО}}^2} \right] = \omega_{\text{АТЗ}} (\Delta R_1 - \Delta R_2), \end{aligned}$$

а

$$S_1 - S_2 = \int_0^T (V_1 - V_2) dt = (\Delta R_1 - \Delta R_2) \Delta \alpha$$

Звідси отримуємо вираз для визначення приросту спрямовуючого кута:

$$\Delta \alpha = \frac{\Delta S}{\Delta R_1 - \Delta R_2}.$$

У якості датчиків швидкості можна використовувати одометри лівих та правих коліс, доплерівські датчики повздовжньої швидкості на лівій та правій стороні АТЗ або акселерометри з інтегровально-обчислювальним блоком 4.

Для підвищення точності оцінки приростів координат АТЗ (блок 17) авторами також пропонується застосування імовірісно-геометричної фільтрації (блок 18), що працює за алгоритмами рекурентної обробки інформації, одержаної від множини сузір'їв навігаційних супутників різних ГНСС (*GPS, Glonass, Galileo та Compass*) та інерціальних датчиків АТЗ.

Кожна навігаційна підсистема (сузір'я навігаційних супутників чи група бортових навігаційних датчиків) забезпечує стандартизовану фігуру (формат) похибок у вигляді опуклих множин – еліпса, кола, прямокутника, квадрата, а у трьохвимірному евклідовому просторі – у вигляді об'ємних геометричних фігур: еліпсоїда, кулі, паралелепіпеда, куба тощо, розміри яких визначаються заданою імовірністю оцінки місцезнаходження споживача (МС) (рис. 2).

Кожний формат похибок являє собою геометричну фігуру, конфігурація якої визначається перетинами m -мірного тіла, що відображає заданий

закон розподілу щільності ймовірностей похибок навігаційних визначень у цьому просторі. Для кожного формату існують свої найбільш імовірні координати МС, що визначаються з певним рівнем достовірності відповідно закону розподілу щільності конкретного формату похибок.

У практичних задачах навігації важливо оцінити імовірність правильного вибору, елементарного формату з припустимими розмірами, у межах якого розташовується об'єкт. Тому доцільно використовувати геометричний підхід до обчислення ймовірностей подій [7, 8].

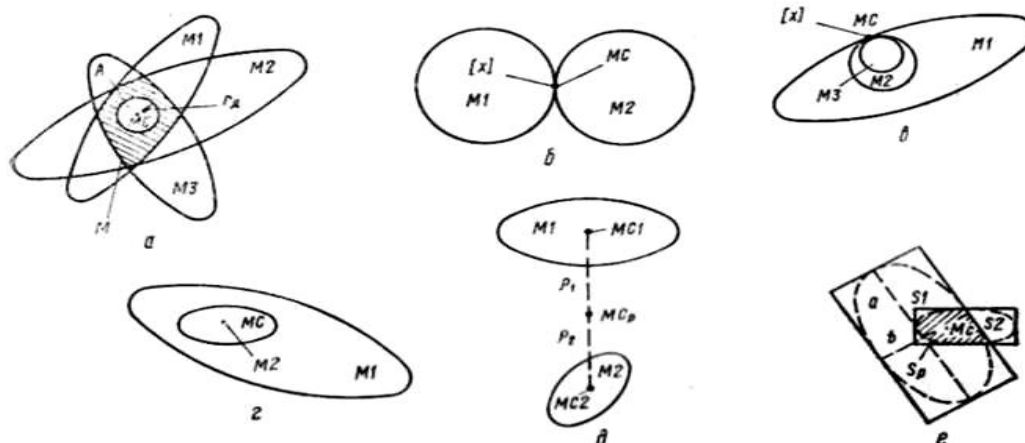


Рис. 2. Варіанти взаємного розташування форматів похибок позиціонування об'єктів

Пропонується один із варіантів побудови алгоритму рекурентної імовірнісно-геометричної обробки навігаційної інформації. Вихідними даними для роботи алгоритму є: координати місця розташування об'єкту на площині x_{01}, y_{01} (отримані, наприклад, із використанням методу найменших квадратів (МНК), методу найменших модулів (МНМ), або за апріорними даними); формат похибок місцевизначення у виді прямокутника (рис. 2, e) зі сторонами a, b , що апроксимує за нормальним законом розподілу похибок відповідний еліпс похибок, рівновеликий по площі, або описаний, та кут орієнтації великої сторони прямокутника α_i (великої осі еліпса) відносно осі OX (рис. 3).

Якщо площу формату елементарної комірки, що характеризує точність і дозвільну здатність РНС при визначенні координат об'єкта, позначити як S_H і виразити через площі більшого S_1 , меншого S_2 форматів, то імовірності перебування РО у межах кожного із них будуть відповідно дорівнювати P_H, P'_H, P''_H (за рівноімовірного влучання об'єкта у будь-яку i -ю комірку), тобто:

$$P_{Hi} = S_i/S_1; \quad P'_{Hi} = S_i/S_2 = P_{Hi}(S_1/S_2); \quad P''_{Hi} = S_i/S_p = P_{Hi}(S_1/S_p).$$

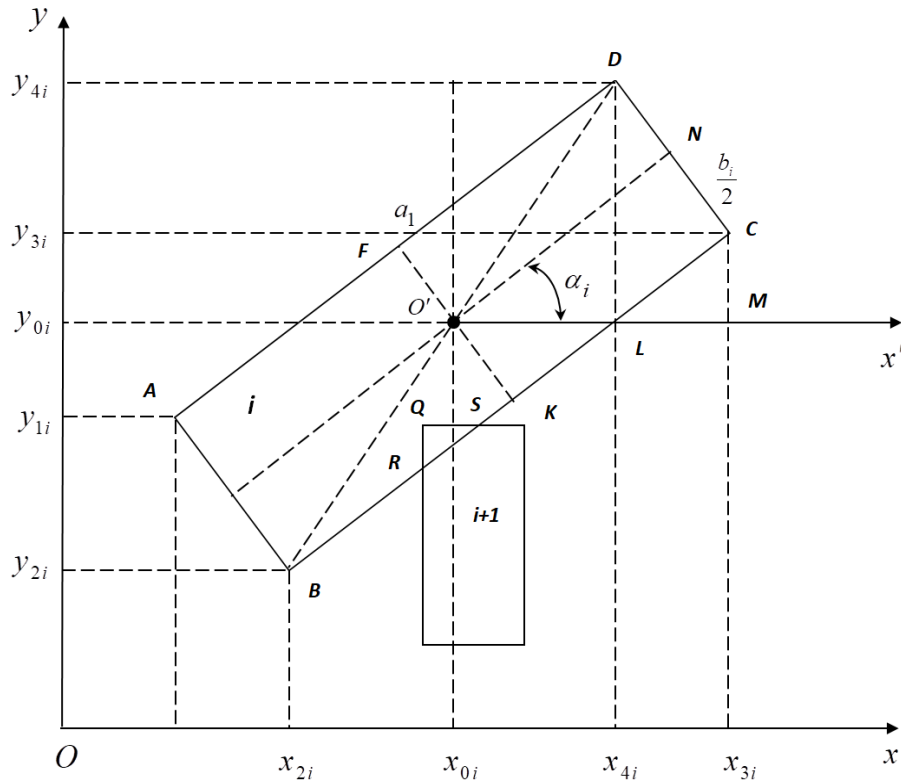


Рис. 3. Проектування форматів похибок позиціювання об'єктів

Визначимо із рис. 3 координати вершин формату похибок через координати місця розташування (центра) x_{0i} , y_{0i} і кут орієнтації α_i . Із трикутника $KO'L$ знайдемо

$$KL = 0,5b_i \operatorname{ctg} \alpha_i. \quad (1)$$

Із трикутника LCM , у якому $LC = a_i/2 - (b_i \operatorname{ctg} \alpha_i)/2$, визначимо:

$$CM = (a_i \sin \alpha_i)/2 - (b_i \cos \alpha_i)/2. \quad (2)$$

Тоді координата y_{3i} вершини C запишеться із урахуванням (2):

$$y_{3i} = y_{0i} + (a_i \sin \alpha_i)/2 - (b_i \cos \alpha_i)/2. \quad (3)$$

Аналогічно, із трикутників $KO'L$ і LCM , визначаючи $O'L$ і LM , знайдемо координату x_{3i} вершини C :

$$x_{3i} = x_{0i} + (a_i \cos \alpha_i)/2 + (b_i \sin \alpha_i)/2. \quad (4)$$

Таким чином, використовуючи (1) - (4), можна визначити координати усіх вершин формату похибок місце визначення об'єкта:

$$\left. \begin{aligned} y_{ni} &= y_{0i} + \prod_{j=1}^n (-1)^j (a_i \sin \alpha_i)/2 + \prod_{i=1}^{n+3} (-1)^j (b_i \cos \alpha_i)/2; \\ x_{ni} &= x_{0i} + \prod_{j=1}^n (-1)^j (a_i \cos \alpha_i)/2 + \prod_{j=1}^{n+1} (-1)^j (b_i \sin \alpha_i)/2, \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

де $i = \overline{1, m}$; $n = \overline{1, 4}$ – відповідно номер формату похибок і його вершини.

Далі, по відомих вершинах i -го формату похибок $\{x_{ni}, y_{ni}\}$; $i = \overline{1, m}$; $n = \overline{1, 4}$ визначимо рівняння сторін i -го формату. Як відомо [7, 10], рівняння прямої, що проходить через дві точки із координатами x_i, y_i і x_{i+1}, y_{i+1} записується у такому виді

$$(x - x_i)(y - y_i) - (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} - y_i) = 0. \quad (6)$$

Відповідно до (6) визначаємо рівняння сторін i -го формату:

$$\left. \begin{aligned} y &= y_{0i} - \operatorname{ctg}\alpha_i x + \operatorname{ctg}\alpha_i x_{0i} + (-1)^{\frac{k+1}{2}} (a_i / 2 \sin \alpha_i), & k &= 1, 3; \\ y &= y_{0i} + \operatorname{tg}\alpha_i x - \operatorname{tg}\alpha_i x_{0i} + (-1)^{\frac{j}{2}} (b_i / 2 \sin \alpha_i), & j &= 2, 4; \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

де $k = 1, 3$ відноситься до менших сторін i -го формату (a_i) (рис. 3), а $j = 2, 4$ – до більших (b_i).

Вирішуючи (7) для пар форматів, тобто для i -го і $(i+1)$ -го, з використанням методу Гауса або LU -розкладання [10], одержуємо чотири групи рівнянь, тобто 16 точок перетинання сторін i -го і $(i+1)$ -го форматів виду $\{x_{lm}, y_{lm}\}$; $l = \overline{1, 4}$; $m = \overline{1, 4}$, де l і m – сторони i -го і $(i+1)$ -го форматів відповідно:

$$\left\{ \begin{aligned} x_{1ki} &= \frac{C_{ki} + C_{ji+1}}{\operatorname{ctg}\alpha_i - \operatorname{ctg}\alpha_{i+1}}, & k &= 1, 3; \\ y_{1ki} &= \frac{C_{ji+1} \operatorname{ctg}\alpha_i - C_{ki} \operatorname{ctg}\alpha_{i+1}}{\operatorname{ctg}\alpha_i - \operatorname{ctg}\alpha_{i+1}}, & j &= 1, 3; \end{aligned} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{aligned} x_{2ki} &= \frac{C_{ki} - D_{ji+1}}{\operatorname{ctg}\alpha_i + \operatorname{tg}\alpha_{i+1}}, & k &= 1, 3; \\ y_{2ki} &= \frac{C_{ki} \operatorname{tg}\alpha_{i+1} + D_{ji+1} \operatorname{ctg}\alpha_i}{\operatorname{ctg}\alpha_i + \operatorname{tg}\alpha_{i+1}}, & j &= 2, 4; \end{aligned} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{aligned} x_{3ki} &= \frac{C_{ki} - D_{ji+1}}{\operatorname{tg}\alpha_i + \operatorname{ctg}\alpha_{i+1}}, & k &= 2, 4; \\ y_{3ki} &= \frac{C_{ki} \operatorname{tg}\alpha_i + D_{ji+1} \operatorname{ctg}\alpha_{i+1}}{\operatorname{ctg}\alpha_{i+1} + \operatorname{tg}\alpha_i}, & j &= 1, 3; \end{aligned} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{4ki} = \frac{D_{ki} - D_{ji+1}}{\operatorname{tg}\alpha_{i+1} - \operatorname{tg}\alpha_i}, \quad k = 2, 4; \\ y_{4ki} = \frac{D_{ki}\operatorname{tg}\alpha_{i+1} - D_{ji+1}\operatorname{tg}\alpha_i}{\operatorname{tg}\alpha_{i+1} - \operatorname{tg}\alpha_i}, \quad j = 2, 4. \end{array} \right. \quad (11)$$

У (8) - (11) kj -я координата відповідає перетинанню k -ї сторони i -го прямокутника і j -ї сторони $(i+1)$ -го прямокутника. Значення коефіцієнтів C_{ki} , D_{ki} визначаються як:

$$C_{ki} = y_{0i} + x_{0i}\operatorname{ctg}\alpha_i + (-1)^{\frac{k+1}{2}} \frac{a_i}{2\sin\alpha_i}; \quad (12)$$

$$D_{ki} = y_{0i} - x_{0i}\operatorname{tg}\alpha_i + (-1)^{\frac{j}{2}} \frac{b_i}{2\cos\alpha_i}. \quad (13)$$

За формулами (12) і (13) можна визначити масиви точок перетину сторін i -го і $(i+1)$ -го форматів (прямокутників), із яких вибирають точки, що належать завданім інтервалам відповідних сторін прямокутників (точки R і S). Потім шукають вершини i -го формату похибок, що належать $(i+1)$ -му формату (точка Q), і визначають координати вершин $\{x_l, y_l\}$; $l = \overline{1, f}$, результуючого багатокутника похибок ($f \geq 3$ – кількість вершин багатокутника).

Слід зазначити, що доцільність обробки i -го і $(i+1)$ -го форматів за $f < 3$ залежить від припустимої величини коефіцієнта кореляції між i -м і $(i+1)$ -м форматами, який можна розрахувати із урахуванням властивостей метричних відстаней:

$$r_{i,i+1} = \cos\Theta_{i,i+1} = (R_{mi}, R_{mi+1}), \quad (14)$$

де $r_{i,i+1}$ – коефіцієнт кореляції векторів до центрів i -го і $(i+1)$ -го форматів; $\Theta_{i,i+1}$ – кут між відповідними векторами; (R_{mi}, R_{mi+1}) – скалярний добуток векторів R_{mi} і R_{mi+1} .

На підставі виразу (14) з урахуванням $r_{\min g} \leq r_{i,i+1} \leq r_{\max g}$ можна оцінити доцільність обробки рознесених форматів (рис. 2, д).

За $f \geq 3$ знаходять площу результуючого багатокутника і центр його ваги, тобто найбільш достовірні координати об'єкту:

$$x_0 = \sum_{i=1}^{f-2} x_i S_i / S_\Sigma; \quad y_0 = \sum_{i=1}^{f-2} y_i S_i / S_\Sigma, \quad (15)$$

де x_i, y_i – координати центра ваги i -х трикутників, із яких складається багатокутник (рис. 4); $S_\Sigma = \sum_{i=1}^{f-2} S_i$ – площа багатокутника; S_i – площа i -го трикутника (рис. 5), яку можна виразити через координати вершин:

$$S_i = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_{i+1} - x_i & y_{i+1} - y_i \\ x_{i+2} - x_i & y_{i+2} - y_i \end{vmatrix}. \quad (16)$$

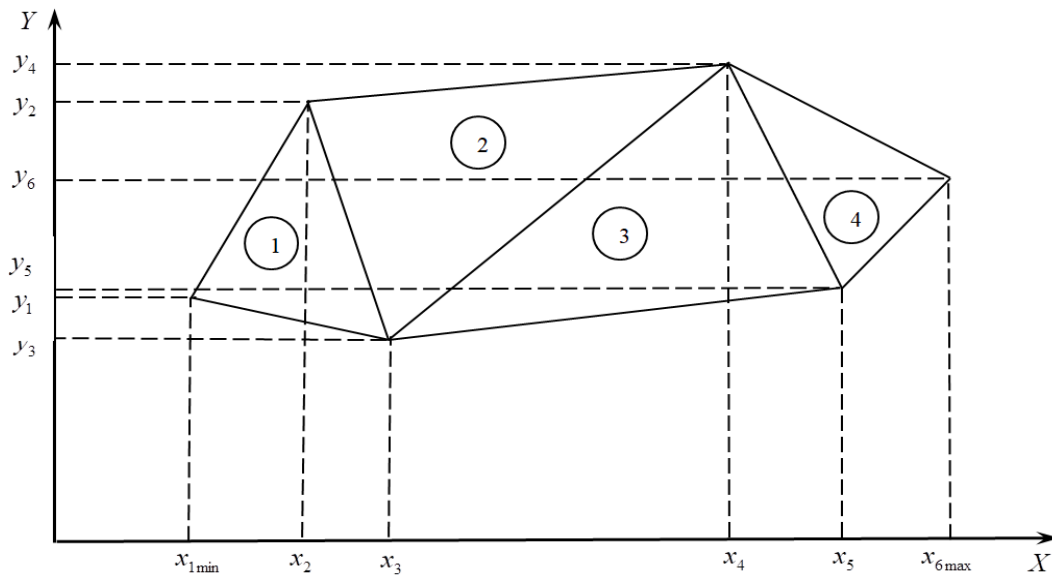


Рис. 4. Багатокутник похибок

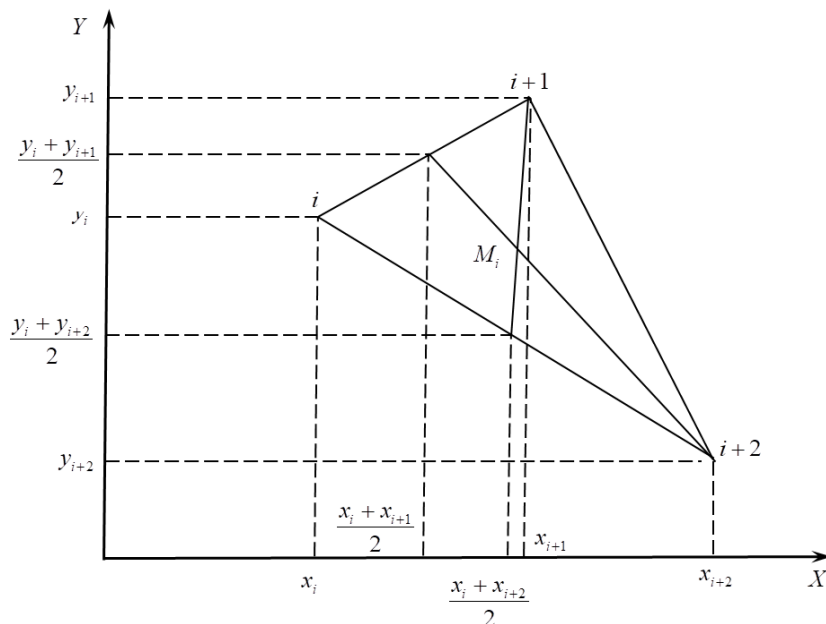


Рис. 5. Трикутник похибок

Визначимо центр ваги i -го трикутника через координати вершин. Оскільки центр його ваги лежить на перетині медіан, то, вирішуючи систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{y - (y_i + y_{i+1})/2}{y_{i+2} - (y_i + y_{i+1})/2} = \frac{x - (x_i + x_{i+1})/2}{x_{i+2} - (x_i + x_{i+1})/2}; \\ \frac{y - (y_i + y_{i+2})/2}{y_{i+1} - (y_i + y_{i+2})/2} = \frac{x - (x_i + x_{i+2})/2}{x_{i+1} - (x_i + x_{i+2})/2} \end{array} \right. \quad (17)$$

визначаємо координати центра ваги i -го трикутника:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{mi} = \frac{C_{i,i+2}DA - C_{i,i+1}EB + d_{i+1,i+2}BA}{2(AD - BE)}; \\ x_{mi} = \frac{C_{i+2,i+1}DE - d_{i,i+2}BE - d_{i,i+1}AD}{2(AD - BE)}. \end{array} \right. \quad (18)$$

де:

$$\begin{array}{ll} C_{i,i+1} = y_i + y_{i+1}; & \\ C_{i,i+2} = y_i + y_{i+2}; & A = 2y_{i+2} - C_{i,i+1}; \\ d_{i+1,i+2} = x_{i+1} - x_{i+2}; & B = 2y_{i+1} - C_{i,i+2}; \\ C_{i+2,i+1} = y_{i+2} - y_{i+1}; & E = 2x_{i+2} - d_{i,i+1}; \\ d_{i,i+1} = x_i + x_{i+1}; & D = 2x_{i+1} - d_{i,i+2}. \\ d_{i,i+2} = x_i + x_{i+2}; & \end{array}$$

Висновки

Наведені вище залежності дозволяють розробити алгоритм уточнення координат, що може бути реалізований у запропонованому ГНСС+ІНС бортовому навігаційному комплексі АТЗ. Для практичної реалізації удосконаленого навігаційного комплексу достатньо використати штатні інерціальні датчики і одометри АТЗ із сигнальними кабелями і цифровим інтерфейсом, звичайний приймач сигналів ГНСС та портативний комп'ютер (планшет чи комунікатор) для проведення комплексної обробки даних та відображення точного положення АТЗ на електронній карті у режимі реального часу. За наявності у складі комп'ютера телекомунікаційного пристрою із підтримкою стандартів *GSM/GPRS* або *3G/4G* мереж можливо передавати точні координати АТЗ у віддалений центр моніторингу і диспетчерського управління автотранспортом.

Наступною важливою задачею на шляху розвитку та удосконалення навігаційного забезпечення АТЗ є комп'ютерне імітаційне моделювання реальних експлуатаційних умов роботи бортових навігаційних комплексів та оцінка ефективності їх функціонування під час впливу внутрішніх та зовнішніх збурюючих факторів. Для вирішення цієї задачі авторами плану-

ється провести детальний аналіз збурюючих факторів, розробити імовірнісні моделі динаміки АТЗ і впливу експлуатаційних умов, а також провести випробування удосконаленого навігаційного комплексу АТЗ.

Список використаної літератури

1. *Беляєвський Л. С.* Обґрунтування методик і алгоритмів просторово-часової обробки навігаційної інформації в автоматизованих супутникових системах управління наземним транспортом / Л. С. Беляєвський, Є. О. Топольськов. // Вісник Північного наукового центру ТАУ. – 2004. – №7. – С. 51–55.
2. *Топольськов Є. О.* Перспективи застосування методики відносної корекції координат для підвищення точності місцевизначення транспортних засобів / Євгеній Олександрович Топольськов. // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – 2004. – №1. – С. 53–56.
3. *Баранов Г. Л., Беляєвський Л. С., Топольськов Є. О.* та інші. Система диспетчерського управління рухомими об'єктами з використанням сигналів глобальної супутникової системи радіонавігації. Патент на винахід МПК(2006), G01S 5/14, UA №75709 (C2).
4. *Беляєвський Л. С.* Удосконалений варіант апаратно-програмного комплексу для автоматизованої системи моніторингу і диспетчерського управління наземним транспортом / Л. С. Беляєвський, Г. Л. Баранов, Є. О. Топольськов. // Вісник Північного наукового центру ТАУ. – 2008. – №11. – С. 58–62.
5. *Беляєвський Л. С.* Алгоритмізація процесів формування і вибору груп навігаційних параметрів в автоматизованих системах управління транспортом із використанням супутникових технологій / Л. С. Беляєвський, Є. О. Топольськов, А. А. Сердюк. // Автошляховик України: Окремий випуск. Вісник центрального наукового центру ТАУ. – К. – 2011. – №14. – С. 34–36.
6. *Беляєвський Л. С.* Імовірісно-геометричні методи навігаційних визначень координат і траєкторій рухомих об'єктів / Л. С. Беляєвський, Є. О. Топольськов, А. А. Сердюк. // Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті. – К.: НТУ. – 2015. – №3. – С. 141–148.
7. *Беляевский Л. С.* Обработка и отображение радионавигационной информации / Л. С. Беляевский, В. С. Новиков, П. В. Олянюк. – Москва: Радио и связь, 1990. – 232 с.
8. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. – Москва: Наука, 1964. – 576 с.
9. *Кондрашихин В. Т.* Теория ошибок и ее применение к задачам судовождения – Москва: Транспорт, 1969. – 256 с.
10. *Колмогоров А. Н., Фомин С. В.* Элементы теории функций и функционального анализа. – Москва: Наука, 1981. – 543 с. – (5).
11. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров: Пер. с англ. – Москва: Наука, 1984. – 831 с.