

УДК 681.324

І.О. Верещак, І.Б. Сіроджа

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського „ХАІ”, Харків

ЗАСТОСУВАННЯ БАЗИ ЙМОВІРНИХ КВАНТІВ ЗНАТЬ ДЛЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО РОБОЧОГО СУЗІР'Я НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКІВ

Розглянуто питання вибору оптимального робочого сузір'я навігаційних супутників із застосуванням бази ймовірних квантів знань.

робоче сузір'я, навігаційний супутник, метазнання, база ймовірних квантів знань

Вступ

Актуальність. Для вирішення навігаційних задач у супутникових радіонавігаційних системах (СРНС) актуальною і проблематичною є задача вибору оптимального робочого сузір'я навігаційних супутників (НС) за критерієм точності місця визначення споживача. Затруднення у вирішенні цього завдання створюються через невизначеність складу НС робочого сузір'я, а також через невідомість взаємного просторового розташування НС і споживача (С), при якому забезпечується необхідна точність місця визначення С для заданого рівня похибок змін [1].

Існують різні способи вибору робочого сузір'я НС [2 – 4], однак, у силу зазначеної невизначеності, вони громіздкі за обсягом обчислень, вимагають тривалого часу для одержання результату і недостатньо ефективні. У зв'язку з цим пропонується знанняорієнтований метод прийняття рішень в умовах імовірнісної невизначеності [7] при виборі складу оптимального робочого сузір'я НС за точнісним критерієм GDOP [3], тобто геометричному факторові погіршення місця визначення С. Метод ґрунтується на дедуктивному логічному висновку шуканого рішення з попередньо синтезованої бази ймовірних квантів знань (БвкЗ), що містить стійку статистичну інформацію про коефіцієнт геометрії K_G , який є мірою зменшення точності навігаційних визначень у СРНС через особливості просторового розташування НС і споживача. Задача вибору оптимального робочого сузір'я (ОРС) НС передує навігаційній задачі визначення розширеного вектора

$$\Pi = (x, y, z, t, t', \dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T \quad (1)$$

стану С, де (x, y, z) – його просторові координати; t' – часове виправлення шкали часу споживача, а $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ – складова вектора його швидкості. Задача ОРС розв'язується за допомогою бортової апаратури споживача (БАС) і змістовно формується так.

Постановка задачі. Вибираються характеристики стандартної орбітальної конфігурації супутників у СРНС, наприклад, ГЛОНАСС (Росія) або GPS

(США), що з високою вірогідністю забезпечують у глобальній робочій зоні видимість із Землі 4-х і більше супутників у будь-якому 24-годинному інтервалі. Для цілком розгорнутої СРНС із 24 НС над радіооб'ємом С у залежності від місця і висоти польоту може розташовуватися від 5 до 11 НС [3].

За допомогою БАС приймається супутникова службова інформація (ефемериди НС, альманах, кодний номер НС, що дозволяє упевнитися про прийом сигналів від потрібного супутника) для обчислення в будь-який момент координат усіх видимих НС і дальність до них.

Потрібно з числа видимих НС вибрати 4 НС, які найкраще задовольняють вимоги С, тобто прийняти знанняорієнтовані рішення про склад необхідності оптимального робочого сузір'я НС за критерієм мінімуму коефіцієнта геометрії K_G з указівкою кодних номерів НС і потрібної інформації.

1. Необхідні метазнання для перебудовування необхідної бази при виборі ОРС НС

Спираючись на публікації [1 – 6], наведемо необхідні метазнання для розв'язання задачі ОРС. Елементи вектора споживача (1) недоступні безпосередньому вимірові за допомогою радіозасобів і підлягають обчисленню різними методами [3, 4]. У псевдодалекомірних методах, які ґрунтуються на вимірах псевдодальностей, як навігаційний параметр $D_{\text{вим.і}}$:

$$D_{\text{вим.і}} = D_i + D' = \left[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 \right]^{1/2} + D', \quad (2)$$

де D_i – істинна дальність від і-го НС до С; D' – невідома, але постійна за час визначення навігаційних параметрів величина; (x_i, y_i, z_i) – координати і-го НС; (x, y, z) – координати С.

Геометричне місце точок простору з однаковим значенням навігаційного параметра називають поверхнею положення. Перетинання двох поверхонь положення визначає лінію положення [3]. Місце

розташування визначається координатами точки перетинання трьох поверхонь положення або двох поверхонь положення є сфера з центром у точці мас НС, але радіус цієї сфери змінений на невідому величину D' . Вимір псевдодальностей до 3-х НС приводить до системи 3-х рівнянь з чотирма невідомими (x, y, z, D') . Для усунення виниклої невизначеності за невідомим параметром D' необхідно провести додатковий вимір, тобто виміряти псевдодальність до 4-го НС. Отримана в такий спосіб система чотирьох рівнянь має точне розв'язання, і, отже, місце розташування С при обмірюваних псевдодальностях визначається як точка перетинання чотирьох поверхонь положення. Це й обґрунтовує метазнання про необхідність мати чотири супутники при формуванні робочого сузір'я.

З теорії і практики навігаційних визначень у СРНС [1 – 4] відомо, що важливою умовою досягнення високої точності обчислень є особливе взаємне просторове розташування робочого сузір'я НС і споживача, при якому забезпечується необхідна точність просторово-часових координат при заданому рівні похибки виміру псевдодальностей. Звідси і впливає ідея використання коефіцієнта геометрії K_G , що у зарубіжній літературі позначається через GDOP – геометричний фактор погіршення місця визначення. Оскільки вектор помилок $\delta_{\text{ош}}$ визначення координат споживача в задачі навігаційних визначень можна записати у вигляді

$$\bar{x}^{(j+1)} - \bar{x}^{(j)} = \delta_{\text{ош}} = (\delta_x, \delta_y, \delta_z, \delta_{D'})^T, \quad (3)$$

а вектор помилок виміру дальностей до НС у вигляді вектора градієнтів

$$\bar{h}(\bar{x}^{(j)}) = \delta_{\text{дал}} = (\delta_{\text{ДНЗМ1}}, \delta_{\text{ДНЗМ2}}, \delta_{\text{ДНЗМ3}}, \delta_{\text{ДНЗМ4}})^T, \quad (4)$$

то

$$\delta_{\text{ош}} = H^{-1} \delta_{\text{дал}}, \quad (5)$$

де

$$H = \left[\frac{\delta \bar{h}^T(\bar{x})}{\delta \bar{x}} \right]^T \quad (6)$$

– матриця градієнтів, яка характеризує розташування НС і С.

Тоді кореляційна матриця помилок визначення просторово-часових координат (ПЧК) споживача визначиться виразом:

$$R_{\text{ош}} = M \left\{ (\delta_{\text{ош}} - m_{\text{ош}}) \cdot (\delta_{\text{ош}} - m_{\text{ош}})^T \right\} = (H^T R_{\text{дал}}^{-1} H)^{-1}, \quad (7)$$

де $R_{\text{дал}} = M \left\{ (\delta_{\text{дал}} - m_{\text{дал}}) \cdot (\delta_{\text{дал}} - m_{\text{дал}})^T \right\}$ – кореляційна матриця похибок виміру псевдодальностей; $m_{\text{ош}}$, $m_{\text{дал}}$ – відповідно вектори математич-

них сподівань похибок $\delta_{\text{ош}}$ і $\delta_{\text{дал}}$.

Таким чином, вираз (7) підтверджує висновок про те, що співвідношення між похибками визначення первинних і вторинних навігаційних параметрів залежить тільки від вигляду матриці градієнтів H , тобто від геометрії взаємного розташування НС і С. На цій основі можна визначити і кількісну характеристику коефіцієнта геометрії K_G . Дійсно, кількісні вирази K_G відповідають випадку, коли похибки визначення псевдодальностей до 4-х НС рівновеликі і некорельовані. У цьому випадку матриця похибки визначення псевдодальностей до 4-х НС рівновелика і некорельована. У цьому випадку матриця

$$R_{\text{дал}} = \delta_{\text{дал}}^2 \cdot I; \quad R_{\text{дал}} = \delta_{\text{дал}}^2 (H^T H)^{-1}, \quad (8)$$

де $\delta_{\text{дал}}^2$ – дисперсія виміру псевдодальностей; I – одинична матриця відповідного розміру.

З (8) випливає, що дисперсії похибок місця визначення і корекції бортового часу є функціями діагональних елементів матриці $(H^T H)^{-1}$. Приймаючи $\delta_{\text{дал}}^2 = 1$ і вважаючи СКВ визначення положення споживача в чотиривимірному просторі (просторово-часове $\delta_{\text{ПВ}}$):

$$\delta_{\text{ПВ}} = \left[\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2 + \delta_{D'}^2 \right]^{1/2} = [\text{tr}(R_{\text{ош}})]^{1/2}, \quad (9)$$

визначимо коефіцієнти геометрії за формулою:

$$K_G = \left[\text{tr}(H^T H)^{-1} \right]^{1/2}, \quad (10)$$

де $\text{tr}(\bullet)$ – слід (trace) кореляційної матриці (7).

У загальному випадку коефіцієнт геометрії K_G визначається за формулою:

$$K_G = \frac{\left[\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2 + \delta_{D'}^2 \right]^{1/2}}{\delta}, \quad (11)$$

де $\delta_{\text{дал}}$ визначається через вектори градієнтів (4).

Величину K_G (11) представляють як різноманітні DOP (Dilution of precision). [3]. Наприклад, для повітряних споживачів (С):

$$K_G^2 = K_{G,\text{П}}^2 + K_{G,t}^2, \quad (12)$$

де $K_G = \frac{\left[\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2 \right]^{1/2}}{\delta_{\text{дал}}}$ – просторовий (PDOP) коефіцієнт геометрії (13);

$K_{G,t} = \frac{\delta_{D'}}{\delta_{\text{дал}}}$ – часовий (TDOP) коефіцієнт геометрії.

Просторовий коефіцієнт геометрії $K_{G,\text{П}}$ поділяють на дві складові, що характеризують точність місця визначення С у СРНС у горизонтальній і вертикальній площинах:

$$K_{\Gamma}^2 = K_{\Gamma.Г.}^2 + K_{\Gamma.В.}^2, \quad (14)$$

де
$$K_{\Gamma.Г.} = \frac{[\delta_x^2 + \delta_y^2]^{1/2}}{\delta_{ДАЛ}} \quad (15)$$

– горизонтальний (HDOP);

$$K_{\Gamma.В.} = \frac{\delta_z}{\delta_{ДАЛ}} \quad (16)$$

– вертикальний (VDOP) коефіцієнт.

У [2 – 5] показано, що мінімальні значення $K_{\Gamma.П.} = 1,5$ досягаються у випадку, коли надземний (повітряний) споживач знаходиться в центрі правильного тетраедра. Для наземного споживача мінімальне значення $K_{\Gamma.Г.} = 1,63$ досягається, коли один НС знаходиться в зеніті, а три інших рівномірно розташовані в горизонтальній площині. $K_{\Gamma.Г.} = 0,577$; $K_{\Gamma.В.} = 1,732$. Найчастіше використовуються параметри $K_{\Gamma.П.}$ (PDOP) і $K_{\Gamma.Г.}$ (HDOP) [3].

У [6] опубліковані значення геометричних факторів, забезпечуваних орбітальним угрупованням супутників, та імовірності P_N видимості заданої кількості $N_{НС}$ супутників, у СРНС ГЛОНАСС, що ми наводимо в табл. 1 як проміжні метазнання для формування робочого сузір'я НС.

Таблиця 1

Значення геометричних факторів

Параметри	4	5	6	7	8	9
P_N	1	1	1	1	0,91	0,58
HDOP \rightarrow $K_{\Gamma.Г.}$	1,41	1,26	1,15	1,03	0,95	0,89
VDOP \rightarrow $K_{\Gamma.В.}$	2,0	1,75	1,7	1,61	1,6	1,55
TDOP \rightarrow $K_{\Gamma.t.}$	1,13	1,03	1,03	0,95	0,93	0,91
PDOP \rightarrow $K_{\Gamma.П.}$	2,45	2,16	2,05	1,91	1,86	1,79
GDOP \rightarrow $K_{\Gamma.}$	2,69	2,39	2,3	2,08	2,08	2,01

Наведені в табл. 1 дані рекомендується використовувати для оцінки точності визначення координат місця розташування С у горизонтальній площині (режим 2-D) і вертикальній (режим 3-D).

2. Побудова ПСВРя (ОРС) для визначення БвкЗ за допомогою v-КМВР як результату вибору ОРС НС за критерієм мінімуму коефіцієнта геометрії $K_{\Gamma.Г.}$

Керуючись викладеними вище необхідними метазнаннями для перебування необхідної БвкЗ з метою вибору оптимального робочого сузір'я (ОРС) НС, опишемо обґрунтовану побудову логічної мережі ймовірних міркувань (ЛМЙМ(ОРС)). Шляхом

трансформації отриманої ЛМЙМ (ОРС) за допомогою алгоритму автоматичного квантування (АЛАК-ВА) синтезується v-квантова мережа виведення рішень (v-КМВР) для розв'язання задачі вибору ОРС НС.

Відповідно до vРАКЗ-методу ЛМЙМ (ОРС) будується за допомогою алгоритму навчання (АЛ-НАВЧ) у режимі навчання за заданими сценарними прикладами навчальних знань (СПНЗ(ОРС)), формованих експертом на основі використання викладених раніше метазнань за даною предметною областю супутникової навігації [3]. При цьому ідея пропонованого методу визначення ОРС НС базується на наступній логіці ймовірних міркувань з використанням зазначених метазнань при виведенні цільового висновку з вихідних знань-посилок. Основним співвідношенням, що характеризує вплив взаємного розташування НС і С на точність навігаційних визначень у СРНС, приймаємо рівняння, що зв'язує похибки визначення первинних і вторинних навігаційних параметрів. Це рівняння одержуємо з ітераційного алгоритму вторинної обробки навігаційної інформації в [3]. Фіксуємо наземний або повітряний С і четвірку НС робочого сузір'я з кількості N видимих НС шляхом перебору, формуємо вихідні дані і розв'язуємо систему зазначених рівнянь для 4-х НС. Результати розв'язання використовуємо для послідовного обчислення матриці градієнтів Н (6), кореляційної матриці помилок $R_{ОШ}$ (7) і коефіцієнту геометрії $K_{\Gamma.НАЗ}$ для наземного С або $K_{\Gamma.ПОВ}$ для повітряного С за відповідними формулами:

$$K_{\Gamma.НАЗ}^2 = K_{\Gamma.Г.}^2 + K_{\Gamma.t.}^2, \quad (17)$$

$$K_{\Gamma.ПОВ}^2 = K_{\Gamma.П.}^2 + K_{\Gamma.t.}^2, \quad (18)$$

з використанням обґрунтованих співвідношень (3) – (16). Попередньо шляхом статистичної обробки результатів навігаційних визначень у СРНС GPS (США) і ГЛОНАСС (Росія) визначаємо довірчі інтервали:

$$K_{НАЗ}^{\min} \leq K_{\Gamma.НАЗ} \leq K_{НАЗ}^{\max},$$

$$K_{ПОВ}^{\min} \leq K_{\Gamma.ПОВ} \leq K_{ПОВ}^{\max} \quad (19)$$

для коефіцієнтів геометрії $K_{\Gamma.НАЗ}$ і $K_{\Gamma.ПОВ}$ оптимального робочого сузір'я НС за точнішим критерієм усереднених за часом і по поверхні земної кулі ($K_{НАЗ}^{\min} = 2,51$, $K_{НАЗ}^{\max} = 2,7$, $K_{ПОВ}^{\min} = 2,68$, $K_{ПОВ}^{\max} = 2,81$). Використовуючи знайдені межі зазначених інтервалів, формалізуємо довірчі умови ОРС НС за критерієм точності місця визначення наземного і повітряного споживача відповідно:

$$(a_{НАЗ} - |b_{НАЗ} - 2K_{\Gamma.НАЗ}|) \geq 0, \quad (20)$$

$$(a_{ПОВ} - |b_{ПОВ} - 2K_{\Gamma.ПОВ}|) \geq 0, \quad (21)$$

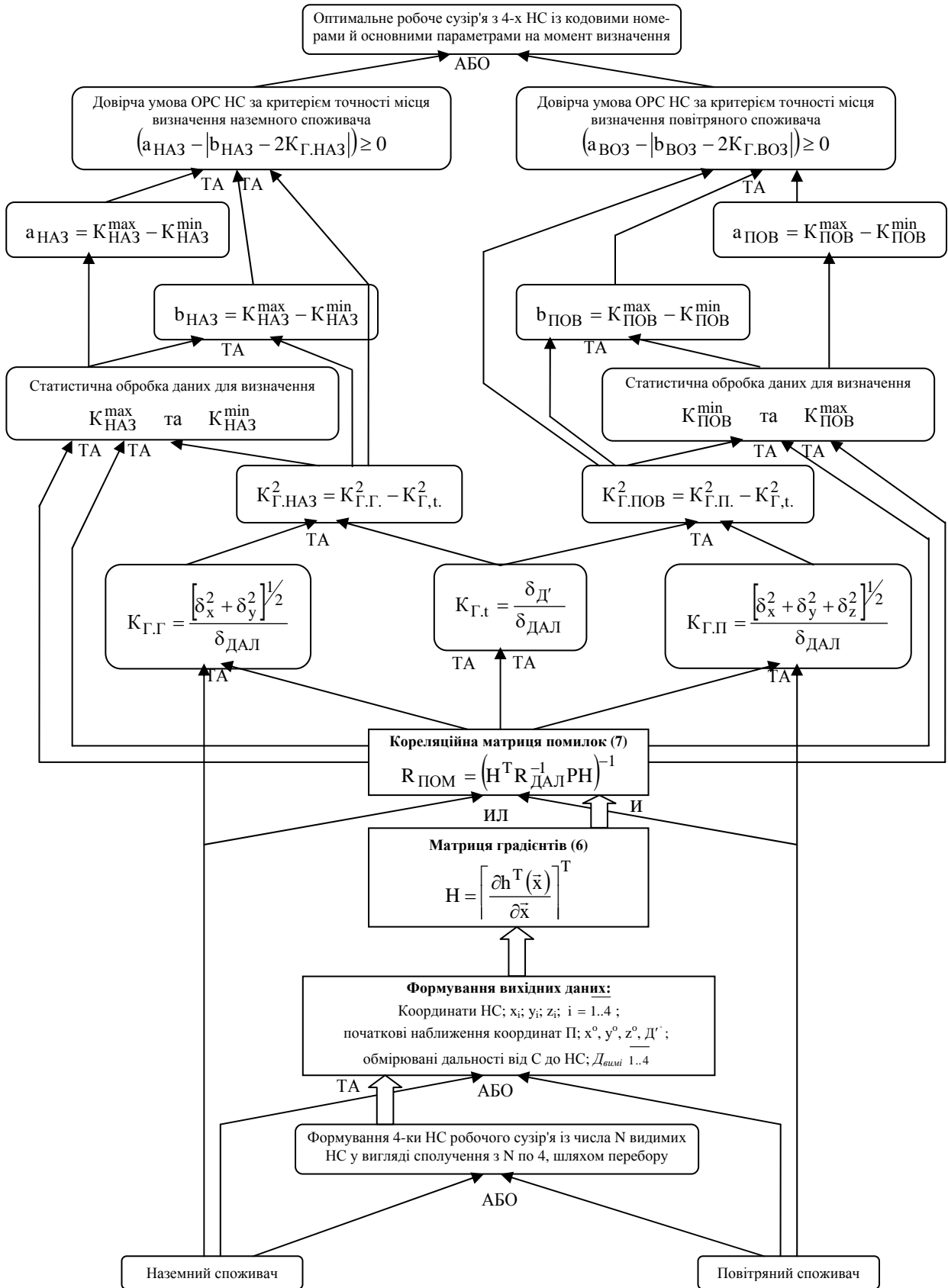


Рис. 1. Логічна мережа ймовірних міркувань ОРНС, побудована в режимі навчання з використанням описаних вище СПНЗ(ОРС) НС

$$\text{де } \left. \begin{aligned} a_{\text{наз}} &= K_{\text{наз}}^{\max} - K_{\text{наз}}^{\min}; & b_{\text{наз}} &= K_{\text{наз}}^{\min} + K_{\text{наз}}^{\max} \\ a_{\text{пов}} &= K_{\text{пов}}^{\max} - K_{\text{пов}}^{\min}; & b_{\text{пов}} &= K_{\text{пов}}^{\min} + K_{\text{пов}}^{\max} \end{aligned} \right\} (22)$$

Для наземного С формується ОРС із 4-х НС із відповідними кодovими номерами і параметрами, при якому виконується умова (20).

Для повітряного С приймається ОРС НС, при якому виконується умова (21). Дані з опублікованих джерел [2 – 6] свідчать, що обсервації за оптимальним сузір'ям з 4-х НС не приводять до істотної втрати точності в порівнянні з обсерваціями, що проводилися за всіма видимими НС. При цьому середньоквадратичне значення $K_{Г.П.} = 2,60$ при усередненні за часом і по поверхні землі, а відповідні середньоквадратичне значення $K_{Г.Г.} = 1,45$ і $K_{Г.Л.} = 1,20$.

Безпосередньо для побудови ЛМЙМ(ОРС) шляхом навчання використовуємо СПНЗ(ОРС), сформовані експертом на основі використання наведених вище метазнань, посилкових знань і цільових вирішень-наслідків. Як посилки використовуються такі вихідні знання:

- ім'я конкретного наземного або повітряного С;
- довільно сформована 4-ка НС робочого сузір'я як комбінація з кількості N видимих НС по 4 із вказівкою кодovих номерів НС;
- координати НС: $x_i, y_i, z_i, i = \overline{1,4}$;
- обмірювані дальності від С до 4-х НС – Д
- початкові наближення координат споживача $(x^0, y^0, z^0, Д^0)$.

Цільовими вирішеннями-наслідками є шукані оптимальні робочі сузір'я (ОРС), що складаються з 4-х НС з ефемеридами і кодovими номерами окремо для наземного і повітряного споживача (С). ОРС НС визначається за допомогою перевірки виведених довірчих умов для ОРС (20) і (21) відносно коефіцієнтів геометрії $K_{Г.НАЗ}$ і $K_{Г.ПОВ}$.

У задачі - ОРС використовуються як навчальні знання такі сценарні приклади навчальних знань – СПОЗ(ОРС):

1. ЯКЩО сформовано 4-ку робочого сузір'я НС для наземного АБО повітряного С і задані посилкові знання (23), ТО за допомогою алгоритму AI_1 бортового обчислювача визначаються матриця градієнтів Н вигляду (6) для відповідного С, а також кореляційна матриця помилок $R_{ПОМ}$ вигляду (7).

2. ЯКЩО відомо кореляційну матрицю помилок $R_{ПОМ}$ відносно наземного АБО повітряного С, ТО формулам (17) АБО (18), відповідно обчислюються коефіцієнти геометрії $K_{Г.НАЗ}$ і $K_{Г.ПОВ}$ з використанням відомих формул (15) і (16).

Одночасно ця і подібна їй інформація використовується для проведення статистичної обробки даних з визначення граничних значень $K_{Г.НАЗ}^2$ і $K_{Г.ПОВ}^2$ в інтервалах (19).

3. ЯКЩО відомі результати зазначеної статистичної обробки навігаційної інформації з визначення узагальнених границь $a_{\text{наз}}, b_{\text{наз}}, a_{\text{пов}}, b_{\text{пов}}$ довірчого інтервалу усередненого коефіцієнта геометрії $K_{НАЗ}^{\max}, K_{НАЗ}^{\min}, K_{ПОВ}^{\max}, K_{ПОВ}^{\min}$, обчислені за формулами (22), і поточні значення $K_{Г.НАЗ}$ та $K_{Г.ПОВ}$ (17) і (18), ТО визначити значення довірчих умов ОРС НС за критерієм точності місця визначення наземного АБО повітряного споживача за формулами (20) або (21) відповідно.

4. За результатами перевірки довірчих умов (20) АБО (21) сформувати файл, що містить оптимальне робоче сузір'я з 4-х НС із кодovими номерами і необхідними параметрами на момент зарубки.

На рис. 1 представлена ЛМЙМ(ОРНС), побудована в режимі навчання з використанням описаних вище СПНЗ(ОРС) НС. За допомогою застосування алгоритму АЛАКВА до отриманого ЛМЙМ(ОРС) НС одержуємо необхідну БвкЗ (ОРС НС), що тут не наводимо через складність представлення.

Список літератури

1. Брандин В.Н., Васильев А.А., Худяков С.Т. Основы экспериментальной космической баллистики. – М.: Машиностроение, 1974. – 340 с.
2. Spilker J.J. GPS signal structure and performance characteristics. – Navigation (USA). – 1978. – V. 25, № 2. – P. 121-146.
3. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Петрова, В.А. Болдина. – М.: ИПРЖР. 1998. – 400 с.
4. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / Под ред. П.П. Дмитриева и В.С. Шебшаевича. – М.: Радио и связь, 1982. – 272 с.
5. Understanding GPS: principle and application, Elliotte Kaplan editor. – Artech House Publishing ERs. – Boston – London, 1996.
6. Bazarov Y. Introduction to Global Navigation Satellite // AGARD LECTURE SERIES 207. System implications and innovative applications of satellite navigation. NATO AGARD, 1996.
7. Сироджа И.Б. Квантовые модели и методы искусственного интеллекта для принятия решений и управления – К.: Наук. думка, 2002. – 420 с.

Надійшла до редколегії 13.11.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Ілюшко, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», Харків.