

УДК 621.7

В.О. Подліпаєв

В/ч А0515

МЕТОДИКИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ІМОВІРНІСНО-ГЕОМЕТРИЧНОГО ПІДХОДУ ДО ПОРІВНЯННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ФОРМАТІВ ПОХИБОК МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТУ

У роботі представлено методику підвищення точності визначення місцезнаходження супутника, обладнаного автономною системою навігації з використання рентгенівських пульсарів. В основі даної методики лежить імовірно-геометричний підхід до порівняння геометричних форматів похибок місцезнаходження космічного апарату.

супутник, автономна система навігації, рентгенівській пульсар, геометричний формат похибки

Вступ

Постановка проблеми. Достатньо велика кількість рентгенівських пульсарів, які можливо використати у якості астрономічних орієнтирів для здійснення вимірювань, та безпосередньо використання декілька способів здійснення вимірювань, дає можливість розглядати таку астронавігаційну систему, як комплексну навігаційну систему.

Виходячи з поняття комплексної навігаційної системи [3, 8, 9, 10] астронавігаційну систему можна уявити, як комплекс підсистем, які можна вважати самостійними навігаційними системами.

В статті підсистемою вважається алгоритм здійснення вимірювань повного складу навігаційних вимірів за визначеною групою астроорієнтирів.

Така побудова астронавігаційної системи має ряд важливих достоїнств:

- підвищення точності, дякуючи оптимізації обробки надлишкової інформації підсистем;
- підвищення надійності навігаційного забезпечення руху КА за рахунок резерву астронавігаційної системи;
- покращення використання навігаційного простору.

Побудована таким чином навігаційна система дає змогу отримувати надлишкову навігаційну інформацію та групувати її у групи за відповідними підсистемами.

Якщо одночасно проводити виміри різними способами, використовуючи різні групи астроорієнтирів, то з'являється достатня надлишковість навігаційної інформації.

У процесі роботи астронавігаційної системи, кожна підсистема здійснює відповідну кількість вимірювань про місцезнаходження (МЗ) космічного апарату (КА) з притаманними їй похибками.

Таким чином, методика підвищення точності визначення параметрів орбіти КА зводиться до оці-

нювання параметрів орбіти КА за більш ефективним методом оцінювання.

Слідством стрімкого зростання високих технологій в технічній сфері і сфері інформації є значне збільшення числа різних задач, що покладаються на КА, а найголовніше – підвищення вимог до їх виконання: оперативність, надійність, точність і т.п. Провівши аналіз більшості задач і умов їх виконання, можна зробити однозначний висновок – сучасні КА повинні мати достатньо надійну і високоточну систему управління. Виходячи з цього, основною узагальнюючою вимогою для виконання всіх задач є вимога точного визначення поточних навігаційних параметрів КА. Виконання даної вимоги зводиться до рішення так званих навігаційних задач [1, 2].

Аналіз літератури. Методи оцінювання до теперішнього часу досить добре розроблені і широко представлені у літературі [1, 5 – 7]. Історію вивчення даного питання можна починати з ранніх робіт Гаусса і Лежандра, також свій внесок внесли Фишер, що запропонував ідею максимально правдоподібною оцінки, і Колмогоров, що розробив теорію послідовної оцінки ймовірності і теорію випадкових процесів [1, 5, 7]. У роботі Вінера [7] сформульовані і вирішені завдання лінійної фільтрації й екстраполяції стаціонарних випадкових процесів у просторі спектральних щільностей потужності. З метою подолання математичних складностей, пов'язаних з рішенням Вінера, був розроблений рекурсивний підхід у часовому просторі. Цей підхід був розвинутий у роботах Левинсона [5], а потім у роботах Калмана і Бьюси, які трактували проблеми оцінювання на основі сучасної теорії систем. Рекурентна форма побудови алгоритмів калмановської фільтрації забезпечила зручність практичної реалізації їх на електронній обчислювальній машині (ЕОМ) у реальному масштабі часу, а даний підхід одержав найбільше поширення для рішення завдання синтезу оптимальних нестационарних слідкуючих фільтрів [1].

Алгоритми калмановської фільтрації засновані на гіпотезі про точну відповідність моделей динаміки станів системи й вимірів досліджуванім фізичним процесам. Однак на практиці, найчастіше, відсутня апріорна інформація про моделі динаміки стану системи і вимірів. Частіше є лише оцінки статистичних характеристик шумів і початкового стану системи. Тому значення параметрів, використовуваних при створенні фільтра, можуть відрізнятися від дійсних.

Це призводить до того, що:

- посилення фільтра не буде оптимальним, тому що воно визначається параметрами реальних процесів;

- коваріаційні матриці, що обчислюють фільтром Калмана, не будуть відповідати дійсним значенням коваріації помилок;

- математичне очікування помилки оцінювання не буде дорівнює нулю.

При роботі з фільтром Калмана варто помітити, що він нестійкий і вимагає завдання початкових умов і значень параметрів як можна точніше відповідають дійсності, а це не завжди можливо. При завданні неточних початкових параметрів фільтр не дає навіть приблизну оцінку помилки.

Зазначені особливості алгоритмів калмановської фільтрації часто роблять їх не адекватними тим умовам, у яких їм доводиться функціонувати, що приводить до зниження ефективності застосування останніх.

Також при математичній обробці результатів вимірювань велике поширення отримав метод найменших квадратів (МНК). В основі даного методу лежить те, що найімовірнішим значенням, яке можливо отримати з ряду вимірів однієї частоти, є таке значення, для якого сума квадратів різностей цього значення і результатів вимірювань є найменшим.

Рішення за методом найменших квадратів є послідовним, оскільки у якості першого приближення параметрів руху КА приймаються не самі близькі до істинних оцінки. Тому результати кожного приближення необхідно використовувати в якості нового приближення і повторювати цю процедуру доти, поки відмінності послідовних уточнених значень параметрів руху не стануть меншими заданих погрешностей рішення навігаційного завдання. Однак такий ітераційний процес рішення, не для всіх дійсних ситуацій вимірювань, є таким, що сходиться. Сходимость забезпечується лише в деякій області відмінності апріорних значень параметрів руху від їх дійсних значень [11]. Застосування МНК є суворо обґрунтованим та здійснюється, коли вимірювання незалежні і нормально розподілені. Застосування цього методу потрібно накопити вибірку вимірювань і тільки потім почати обробку інформації, що за часом, отримання оцінок буде значно довше. Крім

того, не вся апріорна інформація буде оброблятися, при здійсненні кожного послідовного етапу [11].

Необхідність накопичення, зберігання і обробка всієї вимірювальної інформації, а також сумарний час на отримання оцінок параметрів обмежує застосування МНК.

Спираючись на умови реалізації методів обробки навігаційних параметрів у бортових ЕОМ, обмеження їх габаритів та потрібної енергії, обробку навігаційної інформації необхідно реалізувати більш простим методом.

Навігація КА може здійснюватися наступними методами:

- методом зовнішньо траєкторних вимірювань [4 - 6];

- методом використання супутникових радіонавігаційних систем [3, 7, 8];

- навігація по випромінюваннях радіотехнічних засобів, які створені не спеціально для цих цілей (радіотехнічні засоби локації, зв'язки, управління і інші) [1,11];

- методом використання тіл Сонячної системи (Сонце, Місяць, Земля і т.д.) [1, 7];

- астронавігаційним методом [1, 9, 10].

Метод траєкторних вимірювань реалізується шляхом вимірювання поточних навігаційних параметрів КА за допомогою наземних траєкторних вимірювальних комплексів. При цьому визначаються параметри руху КА (кутова дальність, радіальна швидкість), потім, за допомогою різних математичних методів визначаються координати і швидкість супутника.

Аналізуючи даний метод по дотриманню вимог до точності визначення координат і швидкості КА, необхідно відзначити, що на точність впливає ряд чинників:

1. Чинники технічної реалізації методу:

- необхідно проводити якомога більше вимірювань, що спричиняє за собою ряд проблем. Якщо проводити вимірювання одним технічних засобом, то воно повинне бути багато параметричним. В зоні радіовидимості станції супутник може знаходитися обмежену кількість часу, що у свою чергу відображається на кількості вимірювань;

- для підвищення точності необхідно задіювати декілька траєкторно-вимірювальних комплексів, що рознесені на значні відстані, що для сучасного положення України є проблематичним в слідстві реалізації однопунктної системи управління КА.

2. Часові чинники:

- оперативність визначення параметрів руху КА не задовольняє сучасним вимогам управління супутником, від моменту вимірювання до моменту корекції параметрів орбіти проходить дуже велика кількість часу, що ускладнює виконання цільових задач, а у ряді випадків просто не допустимо.

Як видно з аналізу, приведений метод не відповідає вимогам глобальності і безперервності, а поняття автономності відсутнє.

Використання супутникових радіонавігаційних систем дозволяє забезпечити необхідні вимоги глобальності і безперервності. Цей метод заснований на використанні рівно розподілених в навколосемному просторі навігаційних КА. Параметри руху кожного з них постійно уточнюються і у будь-який момент часу відоме їх місце розташування. В полі видимості КА завжди знаходиться достатня кількість навігаційних супутників, які передають власні ефемериди, для визначення параметрів руху.

Вимоги глобальності і безперервності виконані, а за наявності на борту відповідних розрахункових алгоритмів можна говорити про певний ступінь автономності. Проте на виконання перерахованих вимог дуже сильно впливає надійність роботи такого виду системи, адже дана система є штучною навігаційною системою і тому потребує постійної підтримки її працездатності. Також ця система схильна як до несанкціонованій, так і свідомій зміні відповідного робочого режиму або її виключенню. Україна вплинути на дану ситуацію не може.

Навігація по випромінюваннях радіотехнічних засобів, які створені не спеціально для цих цілей, також практично реалізовано. Маючи на борту бази даних про розташування і випромінюванні радіотехнічних засобів, які можна в даний момент використовувати як навігаційний орієнтир, і використовуючи відповідні математичні алгоритми, можливо вирішити задачу визначення параметрів руху КА. Проте характеристики радіотехнічних засобів можуть бути змінені або просто у момент прольоту супутника засобу можуть бути вимкнені. Мінливість атмосфери утрудняє процес розрахунку помилок. Все це збільшує ступінь залежності від чинників точності рішення навігаційної задачі.

Використання тіл Сонячної системи також можливо для визначення поточних навігаційних параметрів КА. Проте у зв'язку з взаємною динамікою КА і цих тіл балістичне розташування об'єктів, по яких здійснюється навігація і КА може бути незадовільним для вирішення поставленої задачі. Таким чином, не задовольняється вимога доступності у будь-який момент часу джерела навігаційної інформації, причому реалізація даного методу вимагає достатньо великих апаратних витрат на борту КА.

Використання зірок як джерел навігаційної інформації дозволяє виконати сучасні вимоги до навігації космічних апаратів, а характеристики зірок відповідають вимогам до навігаційних орієнтирів для точного визначення параметрів руху супутника.

Реалізовані системи астронавігації, що візують поле зірок, представляють собою складні оптико-електронні системи із значними обчислювальними і

програмно-алгоритмічними ресурсами. Причому ці системи схильні "засліпленню" унаслідок випадкової орієнтації на Сонці або навмисного напрямку лазера. До того ж, системи, що використовують у якості показника ідентифікації характерний малюнок сузір'я, повинні мати в бортовій пам'яті величезну кількість інформації – карти зоряного неба.

Враховуючи задоволення всім необхідним вимогам, незважаючи на недоліки астронавігації з погляду апаратного нарощування бортового забезпечуючого комплексу, оптичної уразливості, доцільно зупинитися на виборі даного методу навігації, усунувши ці недоліки шляхом вибору нових характеристик зірок, а саме рентгенівського випромінювання.

Мета статті – запропонувати метод комплексної обробки навігаційних параметрів, який передбачає, з початку обробку навігаційних параметрів (НП) та їх групування з застосування МНК або інших порівняно простих алгоритмів, а потім здійснення сумісної рекурентної обробки даних з врахуванням форматів погрішностей місцезнаходження КА. Цій метод спирається на порівняно прості логіко-геометричні операції, які потребують обмежену кількість точних математичних операцій [2].

Постановка задачі і викладення матеріалів дослідження

Оцінимо місце розташування КА у просторі по комплексу навігаційної системи, яка забезпечує стандартизовані фігури погрішностей (формат погрішностей) у вигляді опуклих тіл: еліпсоїда, кулі, паралелепіпеда, куба та інше), розміри яких визначаються заданою імовірністю оцінки місця знаходження КА. Кожен формат погрішностей являє собою геометричну фігуру, конфігурація якої визначається перетинами m -мірного тіла, що відображає заданий закон розподілу щільності ймовірностей погрішностей навігаційного визначення у цьому просторі. Для одержання найвищої точності попарно порівняємо формати в єдиній системі відліку: найменший результуючий з черговим. Послідовно повторюючи цю процедуру по мірі одержання інформації від інших джерел, скомбінуємо формати та обробимо їх. Шляхом накладання і взаємного проектування форматів погрішностей досягається мінімізація результуючого формату, утвореного перетинанням порівнюваних опуклих множин. Координати місця розташування КА будуть відповідати центру ваги результуючого формату погрішностей, для якого визначається максимально правдоподібна оцінка [2].

Для рішення цієї задачі необхідно установити критерії вибору (оцінки) результуючого формату погрішностей визначення МЗ КА з урахуванням геометрії порівнюваних вихідних незалежних форматів та їхньої орієнтації.

Для спрощення уявлення і проведення розрахунків будемо використовувати проєкції форматів погрішностей на координатні площини трьохмірного простору. Таким чином, при вирішенні завдання ми будемо оперувати вже не опуклими тілами, а їх проєкціями - опуклими множинами (еліпс, куля, прямокутник, квадрат та інше). Для визначення координат місцезнаходження КА необхідно використання проєкцій, як мінімум на дві координатні площини.

Відповідно, як показано на рис. 1, порівнювані формати погрішностей МЗ КА геометрично можуть розташовуватися по-різному, утворювати різні підмножини.

При цьому виникають наступні питання:

1. Які граничні межі перетинання опуклих множин з урахуванням різних варіантів їхнього взаємного положення, зазначених на рис. 1, і необмеженого зростання їхнього числа (тобто як досліджувати асимптотичні властивості результуючих форматів похибок при збільшенні обсягу вибірок навігаційних параметрів)?

2. З яких міркувань повинні бути задані мінімально припустимі розміри перетинання опуклих множин, обумовлені критерієм припинення обробки великого числа надлишкових форматів?

3. Які оцінки результуючого формату похибок місця знаходження КА, якщо формати не перетинаються і розташовані: а) один усередині іншого; б) з рознесенням на площині (у просторі)?

Для відповіді на ці питання можна скористатися математичними обґрунтуваннями, що обумовлюються властивостями опуклих множин і наведені у працях Л.С. Беляєвського [2].

Твердження 1. Перетинання будь-якого числа n опуклих множин лінійного метричного простору, що містять довільну опуклу множину A , прагне до замикання останнього $[A]$ при необмеженому зростанні n .

Твердження 2. Перетинання нескінченного числа замкнених непорожніх вкладених опуклих множин у повному лінійному метричному просторі зводиться до однієї точки.

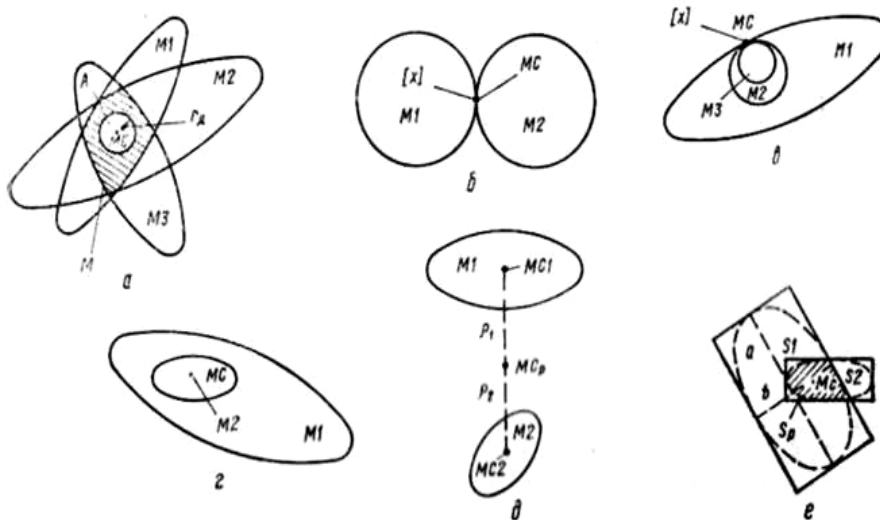


Рис. 1. Взаємне положення форматів погрішностей місце визначення

Таким чином, обробка форматів похибок місцезнаходження зводиться до мінімізації площі (об'єму простору) результуючої геометричної фігури, обмеженої перетинанням опуклих множин, тобто порівнюваних форматів.

Задачу оптимізації результуючого формату похибок місце визначення будемо вирішувати із застосуванням вихідних прямокутних форматів похибок місцезнаходження КА (рис. 1, e), що апроксимують площу рівновеликого або вписаного стандартизованого еліпса похибок, побудованого з урахуванням заданої імовірності визначення місцезнаходження КА.

Це пов'язано з тим, що саме прямокутний формат найбільше повно відповідає вимогам практики навігації КА, більш інформативний, ніж круговий,

забезпечує менш трудомісткі розрахунки точності оцінки координат, ніж еліптичний.

Оскільки результуючий формат погрішностей місцевизначення являє собою багатокутник (багатогранник у m -мірному просторі), то після побудови його потрібно апроксимувати більш простою фігурою, що дозволяє одержати більш точну оцінку місця розташування об'єкта в сенсі використовуваного критерію якості.

Наприклад, потрібно відшукати КА у межах результуючого формату похибок, що являє собою інформаційну множину $S = \bigcap S_i$, тобто таку точку $\xi \in S$, що мінімізує показник якості оцінки:

$$G = \max |\xi - S| \quad (1)$$

Так як істинне положення КА, що характеризується вектором $\xi \in S$, задалегідь належить результуючому формату похибок, то мінімум функціонала (1) обмежує зверху максимальну похибку оцінки координат

$$\|\xi - \xi\| \leq G = \min_{\xi \in S} \max_{s \in S} \|\xi - s\|. \quad (2)$$

Як випливає з (1), найкраща в сенсі функціонала (2) оцінка ξ має геометричну інтерпретацію у вигляді центра n -мірної кулі з мінімальним радіусом G , описаної навколо результуючого формату похибок, тобто опуклого багатогранника.

Розглянуті критерії вибору і мінімізації результуючого формату шляхом послідовного попарного порівняння вихідних форматів похибок адекватно можуть бути використані для одночасного порівняння будь-яких комбінацій m форматів із заданого числа джерел інформації n . При цьому може бути отримане надлишкове число комбінацій форматів $M = C_n^m$, утворених на основі методики групування НП.

Отже, описано ймовірно-геометричний метод оцінки результуючого формату погрешностей місцезнаходження КА, що припускає попередню побудову еліпсів і прямокутників, у межах яких із заданою ймовірністю знаходиться місце КА. Методика побудови еліпсів погрешностей ґрунтується на вираженні розмірів півосей еліпса через середньоквадратичне відхилення (СКВ) похибок навігаційних вимірів і задані коефіцієнти вірогідності (λ) навігаційних вимірювань. При визначенні місцезнаходження КА за інформацією від N різних наземних станцій (НС) ймовірність невиходу КА за межі результуючого формату похибок буде розраховуватися за формулою:

$$P_H = 1 - \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^m (1 - P_{ij})$$

де P_{ij} – ймовірності невиходу КА за межі ij -го еліпса погрешностей; N – число сумісно оброблюваних форматів НС; m – число форматів однієї НС, отриманих при вимірі в різні моменти (число сканувань); P_H зростає при збільшенні N і m .

Ймовірність невиходу місцезнаходження КА за межі результуючого формату похибок, що мінімізується, буде зростати лише при фіксації припустимих відхилень навігаційних параметрів (при оцінці місцезнаходження КА), по відношенню, до яких масштаб закону розподілу (по осі абсцис) буде зменшуватися. При цьому результуюче СКВ буде функцією площі результуючого формату похибок місцезнаходження КА і, зокрема, для прямокутного формату

$$\sigma_p = \text{ent}(S_p / 2b) / \lambda = \text{ent}(2a / \lambda),$$

де a, b – велика і мала півосі еліпса похибок, уписаного в прямокутний результуючий формат похибок (або рівновеликого йому).

Ймовірність правильного вибору оцінок місцезнаходження КА буде збільшуватися пропорційно відношенню площ вихідного (найбільшого) формату погрешностей і найменшого результуючого, отриманого на основі наведеного нижче методу геометричного порівняння.

У подальшому доцільно розробити алгоритм обробки форматів похибок визначення координат КА, де результуючий формат похибок апроксимується прямокутником. При цьому для визначення місцезнаходження КА мінімізуються середньоквадратичні відхилення за МНК.

Розглянемо один з варіантів побудови алгоритмів рекурентної геометричної обробки надлишкової навігаційної інформації, вважаючи за рекурсію послідовне додавання інформації про місце розташування КА від ряду просторово рознесених НС, або використовуючи послідовні в часі надлишкові виміри однієї системи. Вихідними даними для розробки алгоритму є: координати місця розташування КА на площині x_{01}, y_{01} (отримані, наприклад, з використанням МНК, або за апріорними даними); формат погрешностей місця визначення у виді прямокутника (рис. 2) зі сторонами a, b , що апроксимує при нормальному законі розподілу похибок відповідний еліпс похибок, рівновеликий по площі, або описаний, та кут орієнтації великої сторони прямокутника α_1 (великої осі еліпса) відносно осі Ox .

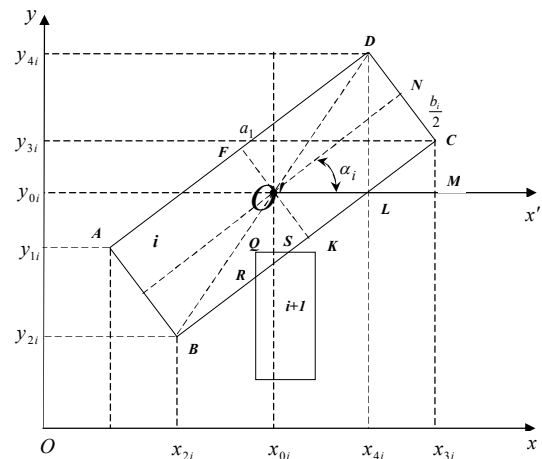


Рис. 2. Проектування форматів погрешностей визначення місця положення КА

Визначимо з рис. 2 координати вершин формату похибок через координати місця розташування (центра) x_{01}, y_{01} і кут орієнтації α_1 .

Координати усіх вершин формату погрешностей місцезнаходження КА:

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

де $i = \overline{1, m}$; $n = \overline{1, 4}$ – відповідно номер формату погрішностей 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.

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

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

Вирішуючи (4) для пар форматів, тобто для i -го і $(i+1)$ -го, з використанням методу Гауса або LU-розкладання [4], 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:

$$\left\{ \begin{aligned} x_{1ki} &= \frac{C_{ki} + C_{ji+1}}{ctg \alpha_i - ctg \alpha_{i+1}}, & k=1,3; \\ y_{1ki} &= \frac{C_{ji+1} ctg \alpha_i - C_{ki} ctg \alpha_{i+1}}{ctg \alpha_i - ctg \alpha_{i+1}}, & j=1,3; \end{aligned} \right. (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} x_{2ki} &= \frac{C_{ki} - D_{ji+1}}{ctg \alpha_i + tg \alpha_{i+1}}, & k=1,3; \\ y_{2ki} &= \frac{C_{ki} tg \alpha_{i+1} + D_{ji+1} ctg \alpha_i}{ctg \alpha_i + tg \alpha_{i+1}}, & j=2,4; \end{aligned} \right. (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} x_{3ki} &= \frac{C_{ki} - D_{ji+1}}{tg \alpha_i + ctg \alpha_{i+1}}, & k=2,4; \\ y_{3ki} &= \frac{C_{ki} tg \alpha_i + D_{ji+1} ctg \alpha_{i+1}}{ctg \alpha_{i+1} + tg \alpha_i}, & j=1,3; \end{aligned} \right. (7)$$

$$\left\{ \begin{aligned} x_{4ki} &= \frac{D_{ki} - D_{ji+1}}{tg \alpha_{i+1} - tg \alpha_i}, & k=2,4; \\ y_{4ki} &= \frac{D_{ki} tg \alpha_{i+1} - D_{ji+1} tg \alpha_i}{tg \alpha_{i+1} - tg \alpha_i}, & j=2,4. \end{aligned} \right. (8)$$

У (5) – (8) 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} визначимо як:

$$C_{ki} = y_{0i} + x_{0i} ctg \alpha_i + (-1)^{\frac{k+1}{2}} \frac{a_i}{2 \sin \alpha_i}; \quad (9)$$

$$D_{ki} = y_{0i} - x_{0i} tg \alpha_i + (-1)^{\frac{j}{2}} \frac{b_i}{2 \cos \alpha_i}. \quad (10)$$

За формулами (9) і (10) можна визначити масиви точок перетину сторін i -го і $(i+1)$ -го форматів (прямокутників), з яких вибирають точки, що належать завданім інтервалам відповідних сторін прямокутників (точки R і S). Потім шукають вершини i -го формату погрішностей, що належать $(i+1)$ -му формату (точка Q), і визначають координати вершин $\{x_l, y_l\}$; $l = \overline{1, f}$ результуючого багатокутника погрішностей ($f \geq 3$ – кількість вершин багатокутника).

При $f \geq 3$ знаходять площу результуючого багатокутника і центр його ваги (найбільш достовірні координати КА)

$$x_0 = \sum_{i=1}^{f-2} x_i S_i / S_{\Sigma}; \quad y_0 = \sum_{i=1}^{f-2} y_i S_i / S_{\Sigma}, \quad (11)$$

де x_i, y_i – координати центра ваги i -х трикутників, з

яких складається багатокутник (рис. 4); $S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{f-2} S_i$ –

площа багатокутника; S_i – площа i -го трикутника (рис. 3), яку можна виразити через координати вершин

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

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

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{y - (y_i + y_{i+1})/2}{y_{i+2} - (y_i + y_{i+1})/2} &= \frac{x - (x_i + x_{i+1})/2}{x_{i+2} - (x_i + x_{i+1})/2}; \\ \frac{y - (y_i + y_{i+2})/2}{y_{i+1} - (y_i + y_{i+2})/2} &= \frac{x - (x_i + x_{i+2})/2}{x_{i+1} - (x_i + x_{i+2})/2}, \end{aligned} \right. (12)$$

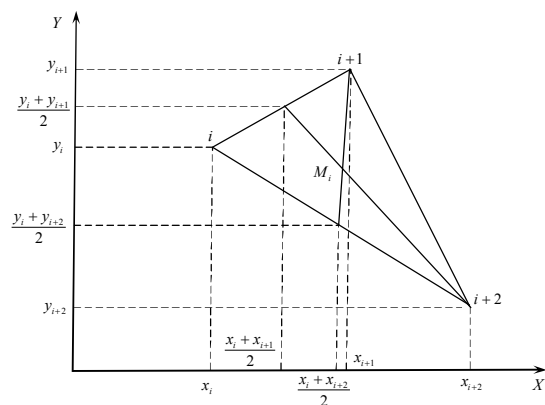


Рис. 3. Трикутник похибок

визначаємо координати центра ваги i -го трикутника:

$$\left\{ \begin{aligned} y_{mi} &= \frac{C_{i,i+2} DA - C_{i,i+1} EB + d_{i+1,i+2} BA}{2(AD - BE)}; \\ x_{mi} &= \frac{C_{i+2,i+1} DE - d_{i,i+2} BE - d_{i,i+1} AD}{2(AD - BE)}, \end{aligned} \right. (13)$$

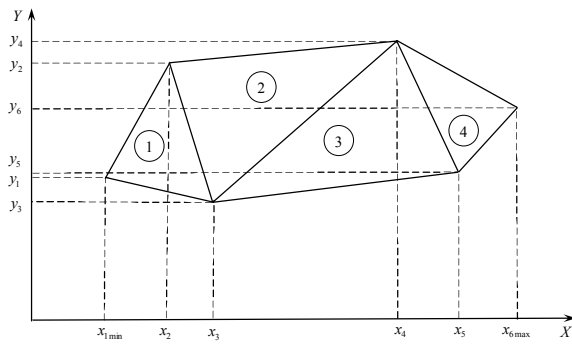


Рис. 4. Багатокутник похибок

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

Наступним етапом рішення задачі визначення результуючого формату похибок місця визначення КА є його апроксимація прямокутним форматом. Для цього площу результуючого формату необхідно доповнити до площі прямокутника (квадрата), що включає цей багатокутник (рис. 4). При цьому апроксимований результуючий формат не зменшує точності оцінки координат об'єкту.

Висновки

Кожні методи підвищення точності місцезнаходження КА тягнуть за собою ускладнення її програмно-алгоритмічної реалізації та збільшення апаратної частини.

1. Заміна звичайних зіркових датчиків на детектори рентгенівського випромінювання спростить апаратну складову та, залишивши таку ж саму вагу, збільшити апаратну чисельність, що надасть змогу використовувати одночасно декілька способів астроорієнтації по декілька групах астроорієнтирах. Таким чином, таку автономну навігаційну систему можна розглядати, як комплексну навігаційну систему з чітко визначеними підсистемами, як складовими навігаційними підсистемами, що здійснюють навігаційні вимірювання.

2. Така побудова системи навігації надасть необхідну, для підвищення точності визначення місцезнаходження КА, кількість надлишкової навігаційної інформації. Однак, для забезпечення достатньої простоти програмно-алгоритмічної реалізації та допустимих вагових показників, необхідно простий методи обробки цієї надлишкової інформації. Для вирішення цієї проблеми пропонується методика оцінювання з використанням імовірно-геометричного підходу до порівняння геометричних форматів похибок визначення місцезнаходження КА.

3. Застосування такого методу до обробки навігаційних параметрів значно підвищить точність визначення параметрів руху КА надасть змогу забезпечити надійність та підвистити ефективність виконання КА цільових завдань не менш чим на 58,34% в умовах обмеженого доступу до супутникових радіонавігаційних систем.

4. Створена програмно-математична модель роботи автономної системи навігації по рентгенівським пульсарам, в якій реалізовано два метода оцінювання навігаційних параметрів: метод найменших квадратів та імовірно-геометричний підхід до порівняння геометричних форматів похибок місцезнаходження КА. В результаті дослідження за допомогою створеної моделі було визначено, що застосування імовірно-геометричного підходу до порівняння геометричних форматів похибок місцезнаходження КА дає точність в декілька раз крашу, ніж МНК.

Список літератури

1. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
2. Беляевский Л.С., Новиков В.С., Олянюк П.В. Обработка и отображение радионавигационной информации. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
3. Беляевский Л.С., Новиков В.С., Олянюк П.В. Основы радионавигации. – М.: Транспорт, 1992. – 320 с.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Пер. с англ. – М.: Наука, 1984. – 831 с.
5. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / Под ред. К.Т. Леондеса. – М.: Мир, 1980. – 407 с.
6. Артюшин Л.М., Машков О.А., Сівов М.С. Теория автоматического керування. – К.: КІ ВПС, 2000. – 320 с.
7. Медич Дж. Статистически оптимальные оценки и управление / Под ред. Шаталова. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
8. Бакицкий В.К., Юрьев А.Н. Корреляционно-экстремальные методы навигации. – М.: Радио и связь, 1982. – 256 с.
9. Автоматизированные навигационные системы / Под ред. Г.А. Крыжановского // Итоги науки и техники. сер. Воздушный транспорт. – 1986. – Т. 14. – 163 с.
10. Цвіркун А.Д. Основы синтеза структурных сложных систем. – М.: Наука, 1982. – 267 с.
11. Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация космических аппаратов. Серия: Авиация и космонавтика. – М.: Дрофа, 2004. – 544 с.

Надійшла до редколегії 27.03.2007

Рецензент: д-р техн. наук, старший науковий співробітник Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків.