

А.Б. Бондарук, В.С. Глухов*, К.С. Євтушенко, Б.О. Оліярник
Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут,
*Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних обчислювальних машин

ГАРАНТОЗДАТНА ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА НАВІГАЦІЇ РУХОМИХ НАЗЕМНИХ ОБ’ЄКТІВ

© Бондарук А.Б., Глухов В.С., Євтушенко К.С., Оліярник Б.О., 2008

Запропоновано підхід до побудови гарантоздатної інтегрованої навігаційної системи рухомих наземних об’єктів.

In this article the approach to the construction of land vehicles dependable integrated navigation system is discussed.

Вступ. Зростаючі вимоги до готовності виконання завдання рухомими наземними об’єктами на гусеничному і колісному ході привели до того, що автоматичні системи їх орієнтації і навігації набули широкого використання. Найпоширенішими системами навігації рухомих наземних об’єктів сьогодні є системи, які побудовані на використанні супутникових навігаційних систем (СНС) в поєднанні з автономними одометричними навігаційними системами (АНС). Сьогодні такі системи називають комплексованими або інтегрованими системами. Використання СНС у комплексі з АНС дозволяє використати переваги та компенсувати недоліки окремих систем і підвищити достовірність навігаційної інформації.

Сьогодні система навігації рухомого наземного об’єкта є однією із систем, які повинні забезпечувати гарантоздатність виконання вогневого завдання комплексом рухомих наземних об’єктів, або рухомих наземних об’єктом, що використовується автономно. Завдання системи навігації – безперервне і точне визначення поточних координат рухомого наземного об’єкта, висоти та дирекційного кута її поздовжньої осі – актуалізується не тільки вимогами точного та вчасного прибуття до кінцевої точки маршруту, а у сучасних умовах, насамперед, вимогами бути готовим до виконання вогневого завдання з непередбачених позицій та з ходу і мінімізації часу реакції від отримання завдання до початку його виконання.

Однією із проблем є забезпечення гарантоздатності (функціональної надійності) інтегрованої навігаційної системи, тобто забезпечення отримання достовірних результатів за умов наявності несправностей та відмов різної природи (як внутрішніх, так і зовнішніх факторів).

Проблемними питаннями також залишаються побудова апаратної структури гарантоздатної інтегрованої системи навігації рухомих наземних об’єктів, яка є інваріантною до об’єкта установлення, а також впровадження структурних алгоритмів комплексування автономної та супутникової навігаційної інформації.

1. Аналіз публікацій і окреслення проблеми. Сучасні системи навігації рухомих об’єктів будуються як інтегровані (комплексовані), які поєднують у собі автономну одометричну навігаційну систему та супутникову навігаційну систему [1, 2, 3]. Інтегровані навігаційні системи у поєднанні з елементами електронної картографії все частіше застосовуються у сучасних наземних рухомих об’єктах на гусеничному та колісному шасі [4, 5, 6], які виконують завдання як у складі комплексів, так і автономно.

Проте питання забезпечення гарантоздатності таких систем у літературі розглянуті недостатньо. Також недостатньо розглянуті питання практичної реалізації та математичного забезпечення (структурних алгоритмів) комплексування автономної та супутникової навігаційної інформації у інтегрованій системі навігації наземних рухомих об’єктів.

2. Мета статті. Метою статті є узагальнення підходів до побудови апаратної структури та математичного забезпечення (структурного алгоритму комплексування навігаційної інформації) гарантоздатної інтегрованої системи навігації рухомого наземного об'єкта, а також до перевірки можливості практичної реалізації.

3. Апаратна структура та принципи роботи інтегрованої системи навігації рухомого наземного об'єкта. Апаратна структура інтегрованої системи навігації рухомого наземного об'єкта наведена на рисунку.



Структура інтегрованої системи навігації наземного рухомого об'єкта

До складу інтегрованої системи навігації рухомого наземного об'єкта входять:

- бортова ЕОМ (БЕОМ);
- блок попереднього оброблення навігаційної інформації (БПОІ);
- апаратура споживачів супутникової навігаційної системи (АС СНС);
- гірокурсоренопоказчик (ГККП);
- давачі швидкості доплерівські правий і лівий (ДШР П, ДШР Л);
- давачі швидкості електромеханічні правий і лівий (ДШМ П, ДШМ Л);
- трикомпонентний давач лінійних прискорень (ДЛП);
- блок шифропроцесора (БШП);
- апаратура зберігання цифрових картографічних даних.

У комплект апаратури також можуть входити засоби ручного визначення початкового дирекційного кута, а саме бусоль з гіронасадкою.

Робота системи ґрунтується на безперервному визначенні (після початкового орієнтування) швидкості руху і кутів орієнтування наземного рухомого об'єкта, а також супутникових навігаційних даних. Дані вимірювань надходять від давачів швидкостей, прискорень та кутів, апаратури споживача супутникових навігаційних систем до БПОНІ для їх попереднього оброблення та комплексування. Результати комплексування (координати, висота, дирекційний кут, кути крену та диференту) передаються на БЕОМ для відображення місцерозташування об'єкта на електронній карті місцевості та подальшого передавання засобами зв'язку іншим абонентам. Картографічні дані зберігаються у спеціальній апаратурі зберігання цифрових картографічних даних. Конфіденційність зберігання картографічних та навігаційних даних забезпечується використанням шифропроцесора.

Давачі швидкостей, прискорень та кутів разом із БПОНІ та БЕОМ утворюють одометричну автономну навігаційну систему (АНС). Апаратура споживача супутникових навігаційних систем разом із БПОНІ та БЕОМ утворюють супутникову навігаційну систему (СНС).

Для вимірювання швидкості руху використовуються давачі швидкості доплерівські, які розміщуються на лівому і правому бортах об'єкта установлення, і давачі швидкості електромеханічні також на лівому і правому бортах. Як один, так і другий тип давачів швидкості мають свої переваги та недоліки. Доплерівські давачі дають відчутні похибки під час руху об'єкта трасою з нерівностями і на пересіченій місцевості, але точно вимірюють швидкості об'єкта в умовах юзу та буксування коліс. Крім того, доплерівські давачі точно вимірюють швидкість руху на великих швидкостях і дають відчутні похибки у разі руху об'єкта із малими швидкостями. Електромеханічні давачі швидкості, що вимірюють кутові швидкості обертання коліс об'єкта, навпаки, чутливі до процесів юзу та буксування об'єкта, точно вимірюють швидкість на малих швидкостях руху. Тому у системі навігації наземного рухомого об'єкта доцільно використовувати як один, так і другий тип давачів швидкості.

Для вимірювання кутів крену, диференту, істинного азимута поздовжньої осі об'єкта використовується гіроскопічний давач ГККП, який має власний відхід від заданого напрямку, причому похибка в обчисленні координат об'єкта за рахунок власного відходу ГККП може значно перевищувати похибку, яка виникає внаслідок неточного визначення швидкості руху об'єкта. Тому доцільне коригування показань ГККП, яке враховує інформацію про швидкість руху лівого і правого бортів. Це коригування реалізується за допомогою спеціального алгоритму, що реалізується в БПОНІ.

АНС, яка утворюється на базі давачів швидкості, прискорень та кутів, характеризується достатніми миттєвими точностями, але згодом у системі нагромаджуються похибки визначення координат за рахунок постійного дрейфу гіроскопів ГККП і похибок обчислення швидкості. Тому досягнення задовільних точностей визначення координат є неможливим після деякого часу роботи АНС. До того ж СНС позбавлена зазначеного недоліку. СНС забезпечує високу точність визначення координат, однак є неавтономною і незавадостійкою системою.

Комплексування навігаційної інформації, що надходить від давачів, передбачає її спільне оброблення на базі алгоритму комплексування навігаційної інформації.

Основною складовою сумарної похибки визначення орієнтування і координат є дрейф ГККП, а також випадкові похибки давачів швидкості. Для зменшення цього впливу розробники паспортизують систематичні складові дрейфу з метою їх компенсації. Однак, випадкові складові дрейфу не піддаються паспортизації. Існує два основних підходи до розроблення методів зниження впливу випадкових складових на точність системи:

– при першому підході випадковий дрейф вводять у розширену математичну модель системи і вирішують завдання оптимальної похибки в динамічному коригованому фільтрі [7];

– при другому підході випадковий дрейф оцінюється наприкінці некоригованої ділянки роботи системи. Час некоригованої ділянки визначається реальними характеристиками давачів, що

входять у систему, і заданою точністю визначення координат та дирекційного кута [8, 9]. Другий підхід, що використаний у системі, яка пропонується, не вимагає апріорної інформації щодо статистичних характеристик дрейфу і простіший для реалізації у БПОНІ.

У БПОНІ з використанням алгоритму комплексування навігаційної інформації за інформацією, що надходить від давачів швидкостей, прискорень та кутів, а також АС СНС, розраховуються поточні координати, висота і кути орієнтування рухомого наземного об'єкта.

У системі передбачено три режими роботи залежно від завдання і наявності достовірної інформації від давачів: супутникова навігація, автономна навігація, комплексна навігація.

Наявність у системі трьох наведених вище режимів навігації забезпечується реалізацією у програмному забезпеченні БПОНІ структурного алгоритму комплексування супутникової та одометричної навігаційної інформації.

4. Структурний алгоритм попереднього оброблення та комплексування навігаційної інформації. Для забезпечення роботи системи навігації у режимах супутникової навігації, автономної навігації та комплексної навігації, автоматичного визначення та переходу до найбільш доцільного режиму навігації у поточних умовах, для визначення та урахування під час роботи можливих несправностей або неправдивої інформації від давачів, різних швидкостей та характеру руху об'єкта, слугує структурний алгоритм [17] попереднього оброблення та комплексування навігаційної інформації [10].

Вхідні дані алгоритму попереднього оброблення та комплексування навігаційної інформації надходять від БЕОМ, АС СНС, давача кутів просторового положення машини (ГККП), давачів швидкостей, трикомпонентного давача лінійних прискорень. До початку руху від БЕОМ надходять, зокрема, ознаки режиму роботи (супутникова навігація, автономна навігація, комплексна навігація), початкові значення кутів, масив даних початкової директиви для АС СНС, початкові координати та висота. Під час руху від БЕОМ надходить ознака працездатності модуля цифрової карти, а також отримана з цифрових картографічних даних поточна висота точки розташування рухомого об'єкта. Від АС СНС надходять ознаки працездатності та достовірності даних, поточний час, прямокутні координати, номер зони, шляховий кут, швидкість, географічні координати та висота, прогнозована СКП вимірювання прямокутних координат. Від давача кутів надходять ознака працездатності, кути азимуту, крену та диференту машини. Від доплерівських та електромеханічних давачів надходять швидкості руху правого та лівого бортів машини. Від трикомпонентного давача лінійних швидкостей надходять лінійні швидкості руху, зокрема, у поперечній площині об'єкта.

Вихідними даними алгоритму комплексування навігаційної інформації є поточні прямокутні координати, номер зони, висота об'єкта, поточні географічні координати, швидкість, дирекційний кут поздовжньої осі об'єкта, кути крену та диференту.

Алгоритм розроблений з урахуванням таких особливостей апаратури.

Під час виконання алгоритму враховуються вищенаведені недоліки та переваги доплерівського та електромеханічного давачів швидкості.

Алгоритм враховує накопичення похибки за рахунок дрейфу гіроскопів та похибок обчислення швидкості. У алгоритмі реалізований принцип оцінювання та зменшення впливу випадкового дрейфу гіроскопу наприкінці некоригованої ділянки роботи системи [8, 9], час якої визначається реальними характеристиками давачів, що входять до складу системи і заданою точністю визначення навігаційних параметрів. За такого підходу не вимагається знання апріорної інформації щодо статистичних характеристик дрейфу, як цього вимагає підхід із застосуванням динамічного коригованого фільтра [7]. В алгоритмі реалізується коригування показань давача кутів, яке враховує інформацію про швидкість руху лівого та правого бортів.

Алгоритм враховує такі недоліки СНС, як неавтономність та незавадостійкість, непрацездатність у разі радіозатінення, недостатня точність визначення висоти, так само як і її

переваги щодо високої, незалежної від часу, точності визначення координат, а також вироблення оцінки точності їх визначення АС СНС.

Алгоритм враховує достатньо великі миттєві точності АНС, так само як і накопичення з часом похибок АНС за рахунок постійного дрейфу гіроскопів і похибок визначення швидкості.

У алгоритмі виконується коригування поточної висоти використанням цифрових картографічних даних, що зберігаються на БЕОМ.

На початку роботи алгоритму відбувається увімкнення та тестування давачів інтегрованої системи навігації, виробляються ознаки їх працездатності. Після цього відбувається контроль працездатності системи та оцінювання можливих режимів роботи. Після вибору алгоритму роботи оператором здійснюється налаштування на вибраний режим роботи. У разі необхідності задаються та відпрацьовуються початкові установки.

Алгоритм передбачає та підтримує три режими навігації: супутникова навігація, автономна навігація, комплексна навігація, залежно від наявності, достовірності та оцінки точності даних, які надходять від давачів.

У режимі супутникової навігації алгоритм використовує інформацію від АС СНС, а також від давачів одометричної системи. Цей режим вибирається, якщо деякі давачі одометричної системи непрацездатні або дають неправдиві результати вимірювань. При цьому давач кутів може бути відімкнений або непрацездатний.

У режимі автономної навігації алгоритм використовує інформацію про кути орієнтування від давача кутів, дані про поздовжні лінійні швидкості лівого та правого бортів машини, які надходять від чотирьох давачів швидкостей, а також поперечні та вертикальні лінійні прискорення, які надходять від трикомпонентного давача лінійних прискорень. Цей режим використовується, якщо дані від АС СНС недостовірні, або оцінюються такими, що мають велику похибку, або наявне радіозатіннення супутників.

Режим комплексної навігації можливий, якщо працездатні АС СНС та ГККП. При цьому, якщо працездатні давачі швидкостей та прискорень, то точність визначення кутів орієнтування підвищується за рахунок компенсації уводу азимута. У цьому режимі комплексування інформації ґрунтується на розрахунку очікуваної середньоквадратичної похибки навігаційних параметрів і визначення допустимого часу руху наземного об'єкта за заданих значеннях точності визначення місцеположення і орієнтування об'єкта, що залежать від завдання.

Алгоритм передбачає автоматичний перехід з одного режиму в інший у разі виявлення під час виконання алгоритму непрацездатності деяких давачів або недостовірності або хибності даних від певних компонентів, а також поновлення роботи у вибраному режимі у разі відновлення працездатності апаратури, що тимчасово була непрацездатна або давала явно неправдиві дані. Здійснюється поточний контроль та відбраковування хибних даних, що можуть надійти від давачів, а також тимчасове відхилення даних від давачів, що дають неправдиву інформацію.

Для фільтрації сигналів, що надходять від давачів кутів, швидкостей, АС СНС використовується різницевий фільтр, побудований на базі апроксимації параболою другого порядку за методом найменших квадратів п'яти послідовних значень вимірюваної величини, що беруться у дискретні моменти часу [11].

5. Забезпечення конфіденційності навігаційної та картографічної інформації. Однією із властивостей гарантоздатної системи є її захищеність, тобто здатність системи зберігати конфіденційність, забезпечувати цілісність [12, 13].

Конфіденційність та цілісність інформації, що циркулює у гарантоздатній інтегрованій системі навігації рухомих наземних об'єктів, забезпечує блок шифропроцесора (ШП) [14, 15]. ШП є засобом протистояння діям ворожого оточення, на нього покладаються завдання криптографічного захисту та верифікації інформації.

Криптографічному захисту у системі підлягають цифрові картографічні дані, які зберігаються у пам'яті БЕОМ та з яких синтезується електронна карта, а також навігаційні дані, якими обмінюються наземні рухомі об'єкти відкритими каналами зв'язку.

Рухомий наземний об'єкт, оснащений гарантоздатною інтегрованою системою навігації, можна розглядати як елемент гарантоздатної системи оброблення навігаційних і картографічних даних [16].

6. Моделювання роботи інтегрованої навігаційної системи. З метою відпрацювання алгоритму комплексування навігаційної інформації та роботи інтегрованої системи навігації рухомих об'єктів була розроблена програмна модель і здійснено імітаційне моделювання.

Моделювання, виконане для інтегрованої системи навігації модернізованої реактивної системи залпового вогню БМ-21У „Град” з урахуванням технічних характеристик та похибок використовуваних давачів, показало, що із використанням у спеціальному бортовому обчислювачі (БПОНІ) розробленого алгоритму досягаються такі значення похибок:

- а) кругова імовірна похибка визначення поточних координат, не більше:
 - на відстань до 3 км – 10 м;
 - відстань більше 3 км – 0,3% від пройденого шляху;
- б) середня квадратична похибка визначення висоти, не більше:
 - на відстань до 3 км – 7,5 м (з використанням даних електронної карти – 5 м);
 - на відстань більше 3 км – 0,3% від пройденого шляху;
- в) середня квадратична похибка визначення дирекційного кута не більше 00-02 (поділок кутоміра).

Отримані значення є значеннями одного порядку порівняно із значеннями похибок, які досягаються системами навігації рухомих наземних об'єктів, що розроблені, наприклад, фірмами LITEF (Німеччина) [5], ВНДІ "Сигнал" (Росія) [4] та іншими розробниками та виробниками систем навігації.

Висновки. У роботі запропонована і обґрунтована апаратна структура гарантоздатної інтегрованої системи навігації рухомих наземних об'єктів.

У програмному забезпеченні БПОНІ системи реалізується алгоритм реального часу комплексування супутникової та одометричної навігаційної інформації. Алгоритм використовує дані давачів позовжньої швидкості (доплерівських та електромеханічних), трикомпонентного давача лінійних прискорень, давача кутів, а також апаратури споживача супутникових навігаційних систем. При цьому забезпечується робота у трьох режимах: супутникова навігація, автономна навігація, комплексна навігація.

Моделювання алгоритму реального часу комплексування навігаційної інформації та роботи системи навігації дозволило отримати її прогнозовані точнісні технічні характеристики.

Гарантоздатність інтегрованої системи навігації рухомого наземного об'єкта забезпечується: загальною структурою апаратних засобів системи, що враховує специфіку об'єктів установа;

наявністю автономної одометричної навігаційної системи та супутникової навігаційної системи та можливістю їх комплексування;

наявністю давачів швидкостей, що побудовані на різних фізичних принципах;

можливістю отримання кутів орієнтування об'єкта як від ГККП, так і обробленням інформації від давачів лінійних прискорень;

попереднім обробленням та комплексуванням навігаційної інформації у БПОНІ із можливістю ручного задавання та автоматичного вибору режиму навігації: супутникова, автономна, комплексна;

коригуванням визначеної висоти об'єкта за допомогою цифрових картографічних даних;

наявністю у системі блока шифропроцесора для забезпечення конфіденційності навігаційної та картографічної інформації.

Запропонований підхід дозволяє побудувати гарантоздатну інтегровану систему навігації рухомих наземних об'єктів із точнісними характеристиками, не гіршими за характеристики аналогів.

1. Анучин О.Н., Емельянец Г.И. *Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов.* – СПб.: ИТМО, 1999. – 357 с.
2. Иванов Ю.П. *Комплексование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов.* – М.: Машиностроение, 1984. – 207 с.
3. Степанов О.А. *Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации // Гирокоспия и навигация.* – 2002. – №1(36) – С.23–46.
4. Н. Кокошкин. *Вторая молодость артиллерии // Военный парад.* – 2001. – №2. – С.64–66.
5. LLN-GX LITEF Land Navigation System Product Description. Document 100059707. February, 3rd 2000. Revision 6.
6. Бондарук А.Б., Глебов В.В., Євтушенко К.С., Оліярник Б.О. *Інтегрована система орієнтації і навігації рухомих бойових машин//Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал.* – Харків, 2008. – №2. – С. 162–165.
7. Степанов О.А. *Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации.* – СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 1998 – 370 с.
8. Волчко П.І., Корольов В.М., Оліярник Б.О. та ін. *Система управління машинами підрозділу на базі навігаційної системи «ТІУС-Н» // В кн.: V Міжнародний науково-технічний симпозіум «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS і GIS технології». Львівське астрономо-геодезичне товариство.* – Львів, 2001 – С.80–83.
9. Оліярник Б.А., Иванов В.И., Королев В.Н. и др. *Использование танковой информационно-управляющей системы „ТІУС-Н” для модернизации реактивной системы залпового огня „ГРАД”//Механіка та машинобудування.* – 2005 – №2 – С.128–224.
10. А. Б. Бондарук, К. С. Євтушенко, В. О. Кононенко, Б. О. Оліярник. *Алгоритм комплексування навігаційної інформації інтегрованої системи навігації бойової машини// Третий международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». Тезисы докладов. Харьков, 22-24 октября 2008 г.*
11. Александров Е.Е., Волков В.П., Волонцевич Д.О., Кононенко В.А. и др. *Повышение устойчивости и управляемости колесных машин в тормозных режимах.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2007 – 320 с.
12. IEC 50(191):1990 *International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 191: Dependability and quality of service.* 135 p.
13. IEC 60050-191-am2 (2002) Ed. 1.0 *International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 191: Dependability and quality of service.*
14. В. Глухов, Н. Заїченко, Б. Оліярник. *Шифропроцесор для бортових інформаційно-керуючих систем. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямком «Інженерна механіка»), випуск 19 (січень 2007). Луцький держ. техн. ун-т, Луцьк. 2007. С.33-43.*
15. Глухов В.С., Євтушенко К.С., Заїченко Н.В., Оліярник Б.О. *Криптографічні засоби спеціалізованої бортової ЕОМ для бронетехніки // Вісн. Хмельницьк. нац. ун-ту. Технічні науки. Том 2.* – 2007. – №2. – С.29–33. Хмельницький, 2007.
16. Бондарук А.Б., Глухов В.С., Євтушенко К.С., Заїченко Н.В., Калінічев В.А., Оліярник Б.О. *Гарантоздатна система оброблення навігаційних і картографічних даних // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні.* – 2008. – Вип. 1(16).
17. Майоров С.А., Крутовских С.А., Смирнов А.А. *Электронные вычислительные машины (справочник по конструированию) // Под ред. С.А. Майорова.* — М.: Сов. радио, 1975.