

# Обробка інформації в складних технічних системах

УДК 629.11-52

Т.Є. Александрова<sup>1</sup>, І.В. Цебряк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

<sup>2</sup>Національна академія Національної гвардії України, Харків

## ЦИФРОВА КОМПЛЕКСІРОВАНА НАВІГАЦІЙНА СИСТЕМА АВТОМОБІЛЯ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*Розглядається структурна схема і алгоритми, реалізовані бортовими обчислювачами автономної і супутникової навігаційних систем, об'єднаних в комплексіровану безплатформу навігаційну систему автомобіля спеціального призначення.*

**Ключові слова:** автономна, супутникова і комплексірована навігаційні системи; бортовий обчислювач; безплатформа інерціальна система.

### Вступ

Автомобілі спеціального призначення оснащені навігаційними системами, під якими розуміють сукупність пристроїв і приладів, що визначають місцезнаходження автомобіля на земній поверхні. Найбільш часто для визначення місцезнаходження автомобіля використовують три системи координат [1]:

- система прямокутних координат, в якій положення точки на земній поверхні задається поточними координатами цієї точки  $X(t)$  і  $Y(t)$  відносно взаємно перпендикулярних вісей  $X$  і  $Y$ . Для побудови прямокутної системи координат земна поверхня розбивається на 60 зон по 6 градусів довготи кожна. У кожній зоні будується своя система координат. За вісь  $Y$  береться лінія екватора, а вісь  $X$  паралельна осьовому меридіану своєї зони і винесена на захід вліво на 500 км. Система прямокутних координат є основною для військово-топографічних карт;

- система полярних координат, в якій положення точки на земній поверхні визначається вектором, модуль якого дорівнює відстані від початкової точки з відомими координатами до точки розташування об'єкта, а його напрямок задається дирекційним кутом  $\alpha(t)$ , відлічуваним за годинниковою стрілкою від вісі  $X$ ;

- система географічних координат, в якій точка місцезнаходження об'єкта на земній поверхні визначається географічною широтою і довготою, а на військово-топографічних картах наноситься як допоміжна система.

Основна навігаційна задача полягає у визначенні поточних координат  $X(t)$  і  $Y(t)$  місцезнаходження рухомого об'єкта. Для цього використовують параметри руху автомобіля, а саме, його поточну швидкість

$v(t)$  і поточний дирекційний кут  $\alpha(t)$ . Поточні координати автомобіля при цьому складають [1]:

$$X(t) = X_0 + \int_0^t v(t) \cos \alpha(t) dt; \quad (1)$$

$$Y(t) = Y_0 + \int_0^t v(t) \sin \alpha(t) dt. \quad (2)$$

Співвідношення (1) і (2) дозволяють зробити висновок, що для вирішення основної навігаційної задачі необхідно:

- безперервно вимірювати швидкість руху автомобіля  $v(t)$ ;
- безперервно вимірювати дирекційний кут  $\alpha(t)$ ;
- безперервно обчислювати тригонометричні функції косинуса і синуса дирекційного кута;
- безперервно обчислювати координати  $X(t)$  і  $Y(t)$ .

Поточна швидкість руху автомобіля спеціального призначення зазвичай вимірюється за допомогою доплерівського датчика швидкості, а дирекційний кут - за допомогою гірополукомпасу [2].

В даний час практично всі вітчизняні автомобілі спеціального призначення оснащені автономними навігаційними системами (АНС). У АНС початкову інформацію  $X_0$ ,  $Y_0$  і  $\alpha_0$  задає водій згідно з яким-небудь орієнтиром, що знаходиться у стартовій точці 0. Надалі система працює автономно до виходу до наступного орієнтиру в точці 1. Але часто відстань між орієнтирами в точках 0 і 1 може бути досить велика, а помилка, що накопичується у визначенні поточних координат може бути такою, що автомобіль взагалі може не вийти на черговий орієнтир.

Помилка, що накопичується обумовлена відводами вісей рамок гірополукомпаса та неточностями вимірювання швидкості руху автомобіля доплерівським датчиком швидкості.

В останні роки широко використовують супутникові навігаційні системи (СНС), що забезпечують високу точність навігаційного забезпечення автомобіля. Однак СНС не є автономними і, в умовах затінення сигналів супутників, зривів зв'язку з супутниками, стають непрацездатними. Одночасне використання АНС і СНР дозволяє виключити недоліки окремих систем і підвищити надійність і ефективність навігаційного забезпечення автомобіля.

### Основна частина

У процесі інтегрування АНС і СНР створюється комплексірована навігаційна система (КНС), в якій СНС використовується для корекції АНС, а в перервах між використанням СНС працює АНС.

Метою роботи, що пропонується, є розробка структурної схеми і алгоритмів функціонування КНС автомобіля спеціального призначення.

Структурну схему запропонованої КНС представимо у вигляді, зображеному на рис. 1, де прийняті наступні позначення: 1, 2, 3 – датчики кутових швидкостей підресореною частини автомобіля відносно її головних центральних вісей інерції; 4, 5, 6 – акселерометри, вісі чутливості яких збігаються з тими ж вісями; 7 – датчик швидкості доплерівського типу; 8 – бортовий обчислювач АНС; 9, 10 – навігаційні супутники; 11 – антена; 12 – апаратура користувача СНС; 13 – бортовий обчислювач СНС; 14 – прилад візуалізації.

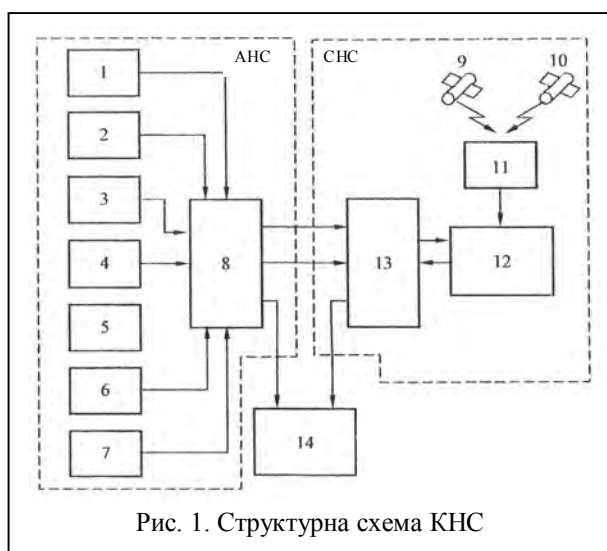


Рис. 1. Структурна схема КНС

У бортовому обчислювачі 8 у відповідності до вихідних сигналів датчиків кутових швидкостей 1, 2 і 3 обчислюється кутова орієнтація автомобіля.

Алгоритм визначення кутової орієнтації має такий вигляд [3, 4]:

$$\begin{aligned} \lambda_0[(n+1)T_a] &= \lambda_0[nT_a] - \frac{T_a}{2} \{ \omega_{xc}[nT_a] \lambda_1[nT_a] + \\ &+ \omega_{yc}[nT_a] \lambda_2[nT_a] + \omega_{zc}[nT_a] \lambda_3[nT_a] \}; \\ \lambda_1[(n+1)T_a] &= \lambda_1[nT_a] + \frac{T_a}{2} \{ \omega_{xc}[nT_a] \lambda_0[nT_a] + \\ &+ \omega_{zc}[nT_a] \lambda_2[nT_a] - \omega_{yc}[nT_a] \lambda_3[nT_a] \}; \\ \lambda_2[(n+1)T_a] &= \lambda_2[nT_a] + \frac{T_a}{2} \{ \omega_{yc}[nT_a] \lambda_0[nT_a] + \\ &+ \omega_{xc}[nT_a] \lambda_3[nT_a] - \omega_{zc}[nT_a] \lambda_1[nT_a] \}; \\ \lambda_3[(n+1)T_a] &= \lambda_3[nT_a] + \frac{T_a}{2} \{ \omega_{zc}[nT_a] \lambda_0[nT_a] + \\ &+ \omega_{yc}[nT_a] \lambda_1[nT_a] - \omega_{xc}[nT_a] \lambda_2[nT_a] \}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $T_a$  – період квантування бортового обчислювача АНС;  $\omega_{xc}[nT_a]$ ,  $\omega_{yc}[nT_a]$ ,  $\omega_{zc}[nT_a]$  – решітчасті функції, що відповідають вихідним сигналам датчиків 1, 2 і 3;  $\lambda_0[nT_a]$ ,  $\lambda_1[nT_a]$ ,  $\lambda_2[nT_a]$ ,  $\lambda_3[nT_a]$  – решітчасті функції параметрів Родріга-Гамільтона, що задовольняють рівнянню

$$\lambda_0^2[nT_a] + \lambda_1^2[nT_a] + \lambda_2^2[nT_a] + \lambda_3^2[nT_a] = 1 \quad (4)$$

та визначають орієнтацію автомобіля.

З виходів акселерометрів 4, 5 і 6 до бортового обчислювача 8 надходять решітчасті функції  $\Delta v_{cx}[nT_a]$ ,  $\Delta v_{cy}[nT_a]$  і  $\Delta v_{cz}[nT_a]$ , що представляють собою проекції зміни швидкостей руху автомобіля на головні центральні вісі інерції підресореної частини корпусу автомобіля, а також решітчаста функція  $v_0[nT_a]$ , що відповідає поточній швидкості руху автомобіля. На підставі інформації, що поступає, обчислювальний пристрій 8 обчислює проекції поточної швидкості автомобіля на вісях X і Y відповідно до алгоритму [4]:

$$\begin{aligned} v_y[nT_a] &= 2\{-\lambda_0[nT_a] \lambda_3[nT_a] + \\ &+ \lambda_2[nT_a] \lambda_1[nT_a]\} v_{cx}[nT_a] + \{\lambda_0^2[nT_a] + \\ &+ \lambda_2^2[nT_a] - \lambda_3^2[nT_a] - \lambda_1^2[nT_a]\} v_{cy}[nT_a] + \\ &+ 2\{\lambda_0[nT_a] \lambda_1[nT_a] + \lambda_2[nT_a] \lambda_3[nT_a]\} \Delta v_{cz}[nT_a]; \\ v_x[nT_a] &= \{\lambda_0^2[nT_a] + \lambda_1^2[nT_a] - \lambda_2^2[nT_a] - \\ &- \lambda_3^2[nT_a]\} v_{cx}[nT_a] + 2\{\lambda_0[nT_a] \lambda_3[nT_a] + \\ &+ \lambda_1[nT_a] \lambda_2[nT_a]\} v_{cy}[nT_a] + 2\{-\lambda_0[nT_a] \lambda_2[nT_a] + \\ &+ \lambda_1[nT_a] \lambda_3[nT_a]\} \Delta v_{cz}[nT_a]. \end{aligned} \quad (5)$$

У співвідношеннях (5) прийняті позначення

$$\begin{aligned} v_{cx}[nT_a] &= v_{0x}[nT_a] + \Delta v_{cx}[nT_a]; \\ v_{cy}[nT_a] &= v_{0y}[nT_a] + \Delta v_{cy}[nT_a]. \end{aligned}$$

З урахуванням (1) і (2) маємо

$$\begin{aligned} X[nT_a] &= X_0 + T_a \sum_{k=0}^n v_x[kT_a]; \\ Y[nT_a] &= Y_0 + T_a \sum_{k=0}^n v_y[kT_a]. \end{aligned} \quad (6)$$

Співвідношення (6) визначають місцезнаходження автомобіля за допомогою АНС. Алгоритми (3) - (6), що реалізуються бортовим обчислювачем 8, дозволяють уникнути використання гірополуконпасів і гіроплатформ, а використовувати тільки гіроскопічні датчики кутових швидкостей і акселерометри, що складають так звану бесплатформену інерційну навігаційну систему (БІНС).

Сучасні АНС, що включають лазерні гіроскопи, доплерівські датчики швидкості і маятникові акселерометри, здатні визначити поточні координати об'єкта з відносною помилкою  $0,2 \div 0,3\%$  від пройденого шляху. Для відкидання накопичених помилок визначення координат застосовується метод контрольного орієнтування. Цей метод використовується в контрольних точках на місцевості, координати яких відомі. У контрольних точках здійснюється уточнення координат об'єкта на місцевості. Недоліком такого методу корекції є необхідність жорсткої прив'язки руху автомобіля до відомих контрольних точок, які можуть бути знищені під час бойових дій, можуть бути закриті попелом, туманом, димом, снігом. СНС визначають навігаційні параметри за допомогою навігаційних супутників, радіопередавачі яких випромінюють сигнали в напрямку Землі. Ці сигнали приймаються антеною 11 апаратури користувача 12, що встановлена на рухомому об'єкті, координати якого підлягають визначенню.

Потреба в оперативній високоточній навігації сухопутних, морських і повітряних об'єктів призвела до появи в 80-90х роках попереднього сторіччя середньорбітальних (висота близько 26000 км) СНС: GPS «NAVSTAR» (США) і ГЛОНАСС - Глобальна навігаційна супутникова система (Росія). Принципи роботи цих систем ідентичні. У навколосемному просторі розгорнута мережа навігаційних супутників у кількості 26 одиниць, які обертаються на 6 орбітах з періодом 11 годин 58 хвилин. На борту кожного супутника розташовуються приймально-передавальна апаратура, сонячні батареї, двигуни корекції орбіт і бортові обчислювачі.

У СНР вимірюється час поширення сигналу від навігаційного супутника до рухомого об'єкта і обчислюється відстань «супутник-об'єкт». Оскільки для визначення місцезнаходження об'єкта необхідно знайти 3 координати:  $X$ ,  $Y$ , і  $H$  (висота об'єкта над рівнем моря), то слід вимірювати відстань від об'єкта до чотирьох навігаційних супутників (рис. 2).

Точність визначення місцезнаходження об'єкта тим вище, чим більший об'єм фігури  $OC_1C_2C_3C_4$ , який залежить від висоти орбіти кожного супутника, кількості супутників і відстані супутників один від одного. Зазвичай в будь-якій точці земної поверхні спостерігається від 5 до 12 супутників в будь-який момент часу. Якщо період дискретності АНС знаходиться в межах  $0,02 \text{ с} \leq T_a \leq 0,05 \text{ с}$ , то період дискретності СНС знаходиться в межах  $1 \text{ с} \leq T_c \leq 10 \text{ с}$ .

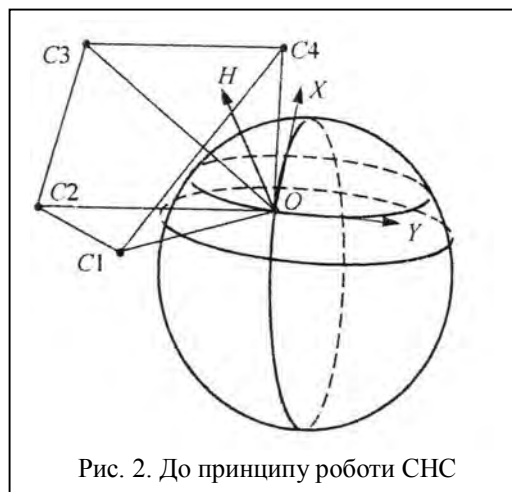


Рис. 2. До принципу роботи СНС

В момент часу  $t = 0$  водій отримує від СНС інформацію про місцезнаходження автомобіля в точці  $X_0$ ,  $Y_0$ , надалі протягом інтервалу  $(0, T_c)$  працює АНС і обчислює координати  $X[nT_a]$  і  $Y[nT_a]$  відповідно до формул (6).

У момент часу  $t = NT_a = T_c$  надходить сигнал від СНС, що визначає координати  $X[T_c]$  та  $Y[T_c]$ , а також середнє квадратичне відхилення

$$\sigma[T_c] = \sqrt{\{X[NT_a] - X[T_c]\}^2 + \{Y[NT_a] - Y[T_c]\}^2}. \quad (7)$$

Якщо  $\sigma[T_c] \leq \sigma_0$ , де  $\sigma_0$  – допустиме середнє квадратичне відхилення, то на інтервалі часу  $(T_c, 2T_c)$  АНС обчислює поточні координати автомобіля за такими формулами:

$$\begin{aligned} X[T_c + nT_a] &= X[NT_a] + T_a \sum_{k=N}^{N+n} v_x[kT_a]; \\ Y[T_c + nT_a] &= Y[NT_a] + T_a \sum_{k=N}^{N+n} v_y[kT_a]. \end{aligned} \quad (8)$$

Якщо,  $\sigma[T_c] > \sigma_0$ , то на інтервалі  $(T_c, 2T_c)$  АНС обчислює координати автомобіля таким чином:

$$\begin{aligned} X[T_c + nT_a] &= X[T_c] + T_a \sum_{k=N}^{N+n} v_x[kT_a]; \\ Y[T_c + nT_a] &= Y[T_c] + T_a \sum_{k=N}^{N+n} v_y[kT_a]. \end{aligned} \quad (9)$$

Точність визначення поточних координат об'єкта за допомогою СНС залежить, як від точності функціонування АНС, так і СНР. Точність функціонування СНС визначається її характеристиками і у розробника автомобіля немає можливості будь-яким чином вплинути на ці характеристики. Що стосується точності АНС, то вона визначається точністю вимірювання параметрів руху об'єкта - кутових швидкостей повороту об'єкта та його лінійних прискорень відносно головних центральних вісей інерції за допомогою гіроскопічних датчиків кутових швидкостей і маятникових акселерометрів, а також точністю вимірювання поточної швидкості за допомогою доплерівського датчика. Крім того, точність АНС залежить також від точності обчислення значень параметрів Родріга-Гамільтона за допомогою систе-

ми різницевих рівнянь (3). Якщо номенклатура навігаційних датчиків є обмеженою і не дає широких можливостей для вирішення завдання підвищення точності АНС, то різноманіття алгоритмів обчислення параметрів Родріга-Гамільтона [5, 6] дозволяє значно її підвищити і, отже, підвищити точність КНС. Один з таких алгоритмів, так званий реверсивний алгоритм з нормуваннями на кожному кроці, полягає в такому. На непарному кроці алгоритму параметри Родріга-Гамільтона обчислюються з системи різницевих рівнянь, кожне наступне з яких враховує рішення попереднього:

$$\begin{aligned} \lambda_1[(n+1)T_a] &= \lambda_1[nT_a] + \frac{T_a}{2} \{ \omega_{xc}[nT_a] \lambda_0[nT_a] + \\ &+ \omega_{zc}[nT_a] \lambda_2[nT_a] - \omega_{yc}[nT_a] \lambda_3[nT_a] \}; \\ \lambda_2[(n+1)T_a] &= \lambda_2[nT_a] + \frac{T_a}{2} \{ \omega_{yc}[nT_a] \lambda_0[nT_a] + \\ &+ \omega_{xc}[nT_a] \lambda_3[nT_a] - \omega_{zc}[nT_a] \lambda_1[(n+1)T_a] \}; \\ \lambda_3[(n+1)T_a] &= \lambda_3[nT_a] + \frac{T_a}{2} \{ \omega_{zc}[nT_a] \lambda_0[nT_a] + \\ &+ \omega_{yc}[nT_a] \lambda_1[(n+1)T_a] - \omega_{xc}[nT_a] \lambda_2[(n+1)T_a] \}. \end{aligned} \quad (10)$$

Значення параметра  $\lambda_0[(n+1)T_a]$  пропонується знаходити з умови (4)

$$\begin{aligned} \lambda_0[(n+1)T_a] &= \\ &= \sqrt{1 - \lambda_1^2[(n+1)T_a] - \lambda_2^2[(n+1)T_a] - \lambda_3^2[(n+1)T_a]}. \end{aligned} \quad (11)$$

На парному кроці алгоритму послідовність обчислення параметрів Родріга-Гамільтона змінюється на зворотну:

$$\begin{aligned} \lambda_3[(n+1)T_a] &= \lambda_3[nT_a] + \frac{T_a}{2} \{ \omega_{zc}[nT_a] \lambda_0[nT_a] + \\ &+ \omega_{yc}[nT_a] \lambda_1[nT_a] - \omega_{xc}[nT_a] \lambda_2[nT_a] \}; \\ \lambda_2[(n+1)T_a] &= \lambda_2[nT_a] + \frac{T_a}{2} \{ \omega_{yc}[nT_a] \lambda_0[nT_a] + \\ &+ \omega_{xc}[nT_a] \lambda_3[(n+1)T_a] - \omega_{zc}[nT_a] \lambda_1[nT_a] \}; \\ \lambda_1[(n+1)T_a] &= \lambda_1[nT_a] + \frac{T_a}{2} \{ \omega_{xc}[nT_a] \lambda_0[nT_a] + \\ &+ \omega_{zc}[nT_a] \lambda_2[(n+1)T_a] - \omega_{yc}[nT_a] \lambda_3[(n+1)T_a] \}. \end{aligned} \quad (12)$$

Значення параметра  $\lambda_0[(n+1)T_a]$  на парному кроці алгоритму задовольняє тому ж співвідношенню (11), що і на парному кроці.

## Висновки

Комплексирована навігаційна система автомобіля спеціального призначення має позитивні властивості як автономної, так і супутникової навігаційних систем.

Точність визначення місцезнаходження автомобіля за допомогою КНС може бути підвищена за рахунок раціонального вибору характеристик навігаційних датчиків АНС, а також за рахунок використання алгоритмів розрахунку параметрів Родріга-Гамільтона підвищеної точності.

## Список літератури

1. Корнеев В.В. Основы автоматики и танковые автоматические системы / В.В. Корнеев. – М. : АБТВ, 1976. – 546 с.
2. Александров Е.Е. Повышение устойчивости и управляемости колесных машин в тормозных режимах / Е.Е. Александров, В.П. Волков, Д.О. Волощев и др. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. – 320 с.
3. Бранец В. Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. – М. : Наука, 1973. – 320 с.
4. Кононенко В.А. Разработка алгоритмов интегрированной навигационной системы вездеходной колесной машины / В.А. Кононенко // Механіка та машинобудування. – 2007. – № 1. – С. 107 - 112.
5. Лебедев Д.В. Информационно-алгоритмические аспекты управления подвижными объектами / Д.В. Лебедев, А.И. Ткаченко. – К. : Наукова думка, 2000. – 216 с.
6. Панов А.П. Математические основы теории инерциальной ориентации / А.П. Панов. – К. : Наукова думка, 1995. – 279 с.

Надійшла до редколегії 4.04.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.М. Любчик, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків.

## ЦИФРОВАЯ КОМПЛЕКСИРОВАННАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА АВТОМОБИЛЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Т.Е. Александрова, И.В. Цебрюк

*Рассматривается структурная схема и алгоритмы, реализуемые бортовыми вычислителями автономной и спутниковой навигационных систем, объединенных в комплексированную бесплатформенную навигационную систему автомобиля специального назначения.*

**Ключевые слова:** автономная, спутниковая и комплексированная навигационные системы; бортовой вычислитель; бесплатформенная инерциальная система.

## DIGITAL COMPLEXED NAVIGATION SYSTEM OF SPECIAL PURPOSE VEHICLES

T.Ye. Aleksandrova, I.V. Tsebruk

*The structural diagram and algorithms which realized by board computers of autonomous and satellite navigation systems that combined in complexed strapdown navigation system of special purpose vehicles is consider.*

**Keywords:** autonomous, satellite and complexed navigation systems; board computer; strapdown inertial system.