

УДК 621.391

**В. І. Кожешкурт, В. В. Юзефович**

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

## **Дослідження схем фільтрації алгоритмів трасової обробки інформації в системах моніторингу динамічних об'єктів**

*Здійснено вибір раціональних схем фільтрації параметрів рухомих (динамічних) об'єктів для вирішення задач їхнього супроводження з урахуванням параметрів існуючих систем спостереження та маневрових можливостей об'єктів. Аналіз ефективності використання різних схем фільтрації проведено шляхом статистичного моделювання.*

**Ключові слова:** динамічний об'єкт, фільтр Калмана, адаптивний фільтр, супроводження, згладжування.

Основу алгоритмів трасової обробки інформації складають схеми фільтрації (згладжування) параметрів руху об'єктів спостереження та їхньої екстраполяції на певний час у майбутньому для направлено пошуку об'єкта, що супроводжується.

На даний час існує велика кількість різних схем фільтрації параметрів руху динамічних об'єктів (у подальшому ДО), що налаштовані на різні моделі їхньої поведінки та характеру збурень [1–3 та ін.]. Однак, як відомо, чим складнішою є модель поведінки, тим складнішими для реалізації і відповідні алгоритми фільтрації. Крім того, будь-яка модель поведінки є лише абстракцією з певним наближенням до реального процесу і, крім того, потребує великої кількості апріорної інформації про ДО. Тобто, більша складність моделі ще не означає високої її адекватності реальному процесу. Тому при виборі відповідної схеми фільтрації доцільно вирішувати компромісну задачу між очікуваною якістю згладжування та складністю реалізації фільтра, тим більше що у «простих» випадках (для стаціонарних процесів) часто «простий» фільтр дає кращі результати згладжування [6].

Аналіз широкого кола різних схем фільтрації для різних випадків показав необхідність вирішення задачі вибору раціональних варіантів побудови схем фільтрації, враховуючи особливості ДО та систем їхнього моніторингу. В даній роботі розглядаються лише рекурентні фільтри, що забезпечують послідовну фільтрацію, оскільки саме такі фільтри найчастіше використовуються на практиці та мають багато переваг у порівнянні з алгоритмами, що працюють зі статистичними

вибірками процесу і в основному використовуються лише для зав'язки (виявлення) трас [3].

Як вже зазначалося вище, при виборі схеми фільтрації першочерговою задачею є визначення моделі руху об'єктів спостереження. При цьому необхідно враховувати, що ефективність застосування тієї чи іншої схеми фільтрації суттєво залежить не тільки від маневрових можливостей ДО, а й від параметрів системи спостереження за об'єктами, а точніше їхнього співвідношення. Тобто, при виборі моделі руху ДО доцільно розглядати безпосередньо процес руху об'єктів спільно з процесом вимірювання системою моніторингу параметрів цього руху. Оскільки, наприклад, навіть для об'єкта, що маневрує (при високому темпі оновлення інформації у порівнянні з його маневровими можливостями), добрі результати фільтрації можуть бути отримані при використанні фільтра лінійної траєкторії, в якому застосовано один із відомих методів забезпечення стійкості (наприклад, одним із відомих шляхів обмеження пам'яті фільтра) [1, 3]. Однак, забезпечення стійкості фільтра, в свою чергу, погіршує результати фільтрації параметрів об'єкта на ділянках його руху без маневру.

Отже при дискретному спостереженні за об'єктом, за відсутності маневру, лінійне рівняння спостереження його стану записується у вигляді:

$$u(k) = F(k, k-1)u(k-1) + G(k)\omega(k), \quad (1)$$

де  $u(k)$  —  $(s+1)$ -мірний вектор дійсних параметрів руху, представленого поліномом  $s$ -го ступеню, на  $k$ -му кроці спостереження;  $F(k, k+1)$  — відома перехідна матриця розміру  $(s+1) \times (s+1)$ ;  $\omega(k)$  — вектор, що характеризує збурення параметрів траєкторії на  $n$ -му кроці спостереження (за відсутності маневру характеризує різноманітні випадкові збурення траєкторії руху ДО);  $G(k)$  — відома матриця.

Залежність між вектором параметрів, що вимірюються, і вектором параметрів, що оцінюються  $u(k)$  (тобто безпосередньо не спостерігаються), у загальному випадку має вигляд:

$$y(k) = H(k)u(k) + v(k), \quad (2)$$

де  $y(k)$  — вектор виміряних параметрів (вектор спостереження), компонентами якого є параметри руху об'єкта, що вимірюються джерелом інформації системи спостереження;  $v(k)$  — вектор похибок вимірювання параметрів руху ДО, який, як правило, вважається некорельованою послідовністю гаусівських векторів з нульовими математичними очікуваннями і кореляційною матрицею  $R(k)$ ;  $H(k)$  — матриця спостереження.

У даній постановці оптимальне вирішення задачі фільтрації може бути отримане використанням класичного фільтра Калмана в дискретному часі.

Дискретний фільтр Калмана, синтезований за рівняннями (1), (2), описується виразами [3, 4]:

$$u^*(k) = F(k, k-1)\hat{u}(k-1), \quad (3)$$

$$\hat{u}(k) = u^*(k) + K(k)(u_{\text{и}}(k) - H(k)u^*(k)), \quad (4)$$

де  $u^*(k)$ ,  $\hat{u}(k)$  — вектори прогнозу й оцінки параметрів руху ДО в момент часу  $k$ ;  $K(k)$  — коефіцієнт підсилення фільтра Калмана, що визначається шляхом вирішення рекурентних рівнянь:

$$P^*(k) = F(k, k-1)\hat{P}(k-1)F^T(k, k-1) + G(k)Q(k)G^T(k), \quad (5)$$

$$K(k) = P^*(k)H^T(k)(H(k)P^*(k)H^T(k) + R(k))^{-1}, \quad (6)$$

$$\hat{P}(k) = P^*(k) - K(k)H(k)P^*(k), \quad (7)$$

де  $P^*(k)$  — кореляційна матриця похибки прогнозу  $\Delta u^*(k) = u^*(k) - u(k)$ ;  $\hat{P}(k)$  — кореляційна матриця похибки оцінки  $\Delta \hat{u}(k) = \hat{u}(k) - u(k)$ .

Недоліком класичного фільтра Калмана є так зване «розходження» фільтра, тобто різке зростання похибок фільтрації і нездатність фільтра налаштуватись у зв'язку з його нечутливістю до результатів вимірювань. Боротьба з цим явищем можлива шляхом обмеження пам'яті фільтра [3].

Для об'єктів, що маневрують, найбільш адекватними вважаються напівмарківські або змішані марківські моделі опису маневру [3, 5]. Однак для практичної реалізації такі фільтри є достатньо складними, оскільки навіть у найпростішому (квазіоптимальному) випадку потребують кількості фільтрів, що дорівнює кількості видів маневру [5]. Крім того, у такому випадку матриця перехідних імовірностей повинна бути апріорно визначеною, в той час як характеристики можливого маневру ДО, як правило, визначити заздалегідь неможливо.

Як відомо, характер руху переважної кількості ДО у часі є сукупністю ділянок руху без маневру (з низькою інтенсивністю маневру) та з маневром. При цьому ділянки інтенсивного маневру є нетривалими у часі. Врахування зазначеної особливості руху ДО дозволяє значно підвищити якість фільтрації параметрів на ділянках відсутності маневру, а отже й на всьому інтервалі спостереження об'єкта, за рахунок використання різних схем фільтрації на ділянках руху без маневру та з маневром. У такому випадку додатково залучається виявлювач маневру для переключення (зміни параметрів) фільтрів. Однак, у сферичній системі координат (в якій працюють усі засоби моніторингу навколишнього простору) траєкторія руху будь-якого ДО описується нелінійними функціями, а отже виявлення маневру в цій системі координат є практично неможливим [1]. Отже модель руху ДО повинна описуватися в прямокутній системі координат.

Таким чином, доцільно використовувати схеми фільтрації, в яких використовується дві моделі руху ДО:

— модель, що розрахована на рух ДО без маневру з деяким збуджуючим шумом невисокої інтенсивності;

— модель, яка розрахована на маневр зі збуджуючим впливом високої інтенсивності, що визначається рівнем маневрених можливостей ДО.

У найпростішому випадку маневр ДО представляється як стаціонарний білий шум з математичним очікуванням, що дорівнює нулю, та дисперсією, яка визначається рівнем інтенсивності маневру, максимальне значення якої визначається з максимально можливих маневрених можливостей ДО (перевантажень) за правилом «трьох сигм».

Такі фільтри відносяться до класу адаптивних фільтрів із виявленням маневру й можуть мати два способи реалізації [3].

При першому способі як базові використовуються два фільтри, перший з яких налаштований на фільтрацію параметрів траєкторії без маневру, другий — на ділянці маневру. Переключення фільтрів відбувається за результатами виявлення початку і кінця маневру. Такі фільтри отримали назву фільтрів Калмана з перемиканням. При другому — використовується лише один фільтр, налаштований, як правило, на рух об'єкта без маневру. При виявленні маневру до рівняння стану об'єкта (1) додається ще один член, що характеризує інтенсивність маневру (прискорення). Інтенсивність маневру в такому разі оцінюється шляхом аналізу нев'язки між вимірними значеннями параметрів та екстрапольованими. Така схема фільтрації отримала назву модифікованого фільтра Калмана.

Відмінність таких фільтрів може полягати в представленні маневру або як випадкового процесу, або як детермінованого процесу з невідомими параметрами [1].

Другий варіант, у нашому випадку, є більш адекватним, оскільки для ДО маневр є частиною їхньої динаміки.

Таким чином, для систем моніторингу ДО, з практичної точки зору, доцільним є використання адаптивних фільтрів згладжування параметрів у прямокутній системі координат, налаштованих на дві моделі руху ДО (без маневру та з маневром детермінованого характеру з невідомими параметрами).

Виходячи з цього, для дослідження доцільності практичного використання для траєкторної обробки інформації про ДО як базові обрано фільтри Калмана I-го (налаштованого на модель руху ДО за виразом:  $x(t) = x_0 + V \cdot t$ ) та II-го порядку (налаштованого на модель руху повітряного ДО за виразом:  $x(t) = x_0 + V \cdot t + a \cdot t^2/2$ ) в дискретному часі.

Оскільки фільтри Калмана є оптимальними для згладжування параметрів за критерієм мінімальної середньоквадратичної помилки, як критерій ефективності фільтрації параметрів руху ДО обрано відношення середньоквадратичного відхилення вимірювань параметрів руху ДО від їхніх дійсних значень до середньоквадратичного відхилення оцінок відповідних параметрів, отриманих фільтром. Дослідження фільтрів проводилися шляхом імітаційного моделювання, в ході якого задавалися різні траєкторії руху ДО, моделювалася процедура вимірювання їхніх координат у сферичній системі координат із заданими точністними характеристиками засобу моніторингу, результати якого, в свою чергу, подавалися на вхід різних схем фільтрації після перерахунку в прямокутну систему координат.

В існуючих автоматизованих системах обробки інформації найбільш поширеним є використання фільтрів, розроблених на основі фільтра Калмана I-го порядку в прямокутній системі координат з обмеженням коефіцієнтів підсилення знизу для підвищення стійкості фільтра. При цьому кожна координата ДО згладжується окремо. (Нагадаємо, що при перерахунку вимірних координат із сфе-

ричної системи координат у прямокутну виникає кореляційний зв'язок між отриманими координатами). При цьому допускається рівнодискретність та рівноточність вимірювання координат. Такі фільтри отримали назву  $\alpha$ ,  $\beta$ -фільтрів [3, 4]. Однак, якщо умова рівнодискретності вимірювань майже відповідає дійсності, то умова рівноточності вимірювань, як вже зазначалося вище, в прямокутній системі координат порушується, оскільки ці похибки суттєво залежать від дальності до ДО, а динаміка їхньої зміни у часі додатково залежить від поточної орієнтації траєкторії ДО відносно джерела вимірювань. Крім того, як показано в [5], модуль коефіцієнта взаємної кореляції похибок оцінки площинних координат ( $X, Y$ ) на ряді азимутальних напрямків досягає 0,7.

Як показано в [1], з цих та інших причин похибка згладжування у такому випадку може додатково зростати до 30 %.

Разом з тим, коефіцієнт взаємної кореляції між площинними координатами та координатою  $Z$  на малих кутах місця приймає значення менше 0,1 [5]. Це дозволяє без відчутних утрат у точності здійснити декомпозицію алгоритму траєкторної фільтрації на горизонтальну та вертикальну складові.

У роботі [6] при вирішенні задачі трасової обробки інформації розглядалися алгоритми згладжування та екстраполяції параметрів руху ДО на основі фільтра Калмана I-го та II-го порядків з такою декомпозицією. При цьому середньоквадратичні похибки визначення координат розраховувалися в кожному циклі оновлення інформації.

Для визначення ефективності роботи цих фільтрів було проведено модельний експеримент з наступними вхідними даними:

— інтенсивність маневру ДО (середньоквадратичне відхилення збуджуючого шуму) за координатами:  $\sigma_{ax} = 60 \text{ м/с}^2$ ;  $\sigma_{ay} = 60 \text{ м/с}^2$ ;  $\sigma_{az} = 1 \text{ м/с}^2$ ;

— середньоквадратична похибка вимірювання координат засобом моніторингу:  $\sigma_\beta = 0,166^\circ$ ;  $\sigma_\varepsilon = 0,166^\circ$ ;  $\sigma_d = 300 \text{ м}$ ;

— період оновлення даних про координати ДО засобом моніторингу — 10 с.

При цьому в ході модельного експерименту ДО на всьому інтервалі спостереження здійснював маневр із заданою інтенсивністю.

Аналіз цих алгоритмів показав, що ефективність використання фільтра II-го порядку за обраним критерієм приблизно на 3 % нижче, ніж фільтра I-го порядку. Тобто, використання фільтра II-го порядку в заданих умовах є недоцільним, тим більше, що він є суттєво математично складнішим, а отже вимагає додаткових обчислювальних витрат.

Таким чином, виходячи з характеристик сучасних засобів моніторингу та маневрених можливостей існуючих ДО, серед проаналізованих алгоритмів фільтрації найбільш ефективним є алгоритм на основі використання фільтрів Калмана I-го порядку з окремою фільтрацією площинних координат і висоти (координати  $Z$ ).

Разом з тим, на ділянках маневру в обох випадках значно зростає похибка згладжування. При цьому, після закінчення маневру необхідний певний час для налаштування точного фільтра на нові параметри руху ДО. Тому важливою задачею з точки зору якості фільтрації є швидке налаштування точного фільтра на нові параметри руху ДО після закінчення маневру.

Як відомо, в оптимальних системах фільтрації процесів з випадковою структурою використовуються зворотні зв'язки між каналами [5]. У [6] за аналогією запропоновано на ділянці маневру ДО здійснювати коригування роботи точних фільтрів результатами роботи грубих, шляхом подання на вхід точного фільтра вектора оцінки параметрів руху ДО, отриманого грубим фільтром.

Для оцінки ефективності використання такої схеми фільтрації (з наявністю зворотного зв'язку між фільтрами) проведено модельний експеримент з наступними вхідними даними:

— інтенсивність маневру ДО (середньоквадратичне відхилення) за координатами:  $\sigma_{aX} = 60 \text{ м/с}^2$ ;  $\sigma_{aY} = 60 \text{ м/с}^2$ ;  $\sigma_{aZ} = 20 \text{ м/с}^2$ ;

— середньоквадратична похибка вимірювання координат засобом моніторингу:  $\sigma_\beta = 0,166^\circ$ ;  $\sigma_\varepsilon = 0,166^\circ$ ;  $\sigma_D = 300 \text{ м}$ ;

— період оновлення даних про координати ДО засобом моніторингу — 10 с.

При цьому, в ході експерименту моделювався наступний характер руху ДО. Спочатку ДО рухався без маневру (здійснював слабкий маневр з інтенсивностями  $\sigma_{aX} = 1 \text{ м/с}^2$ ;  $\sigma_{aY} = 1 \text{ м/с}^2$ ;  $\sigma_{aZ} = 1 \text{ м/с}^2$ ), далі здійснював маневр по площині з вищезазначеною інтенсивністю і після завершення маневру по площині, здійснював маневр по висоті.

У результаті встановлено, що при використанні схеми фільтрації зі зворотними зв'язками, налаштування точного фільтра здійснюється на 4–6 періодів оновлення швидше, ніж при використанні схеми без зворотних зв'язків. При цьому на цій ділянці руху ДО (тривалістю 4–6 оглядів) ефективність фільтрації зростає приблизно в 2–2,5 рази. (Більш детально результати порівняння різних алгоритмів показано на рис. 1).

Окремою задачею (рис. 2) є згладжування курсу ДО, особливо, якщо швидкість руху ДО є такою, що лінійне пересування ДО за інтервал спостереження менше ніж лінійне значення похибок вимірювання координат. На рис. 2 показано результати моделювання в середовищі Matlab руху об'єкта зі швидкістю 10 м/с на відстані 200 км від джерела інформації з періодом огляду простору 10 с, що характеризується наступними середньоквадратичними похибками (СКП) вимірювання: СКП вимірювання дальності 300 м, СКП вимірювання азимуту та кута місця —  $20'$ . Дійсна траєкторія руху об'єкта, що не маневрує, яку отримано в результаті спостереження ДО на протязі 100 оглядів, показана прямою лінією. Сірим кольором позначено результати вимірювання координат ДО джерелом інформації, чорним — результат роботи фільтра Калмана I-го порядку по згладжуванню площинних координат об'єкта. Очевидно, що якщо курс ДО буде розраховуватися безпосередньо за результатами роботи фільтра, його значення буде змінюватися майже хаотично від огляду до огляду на досить тривалому проміжку часу. Оскільки ряд важливих задач споживачами інформації вирішується на основі аналізу курсу (наприклад, задача диспетчерського контролю та управління рухом цивільної авіації) — згладжування курсу ДО є окремою актуальною задачею [6].

У [1, 3] для вирішення цієї задачі пропонується застосовувати експоненціальне згладжування, оскільки цей метод є найбільш простим і досить ефективним способом згладжування незмінних у часі параметрів. У загальному випадку, рівняння експоненціального згладжування (записане для оцінки курсу на  $k$ -му кроці спостереження —  $\hat{Q}_k$ ) має вигляд [7]:

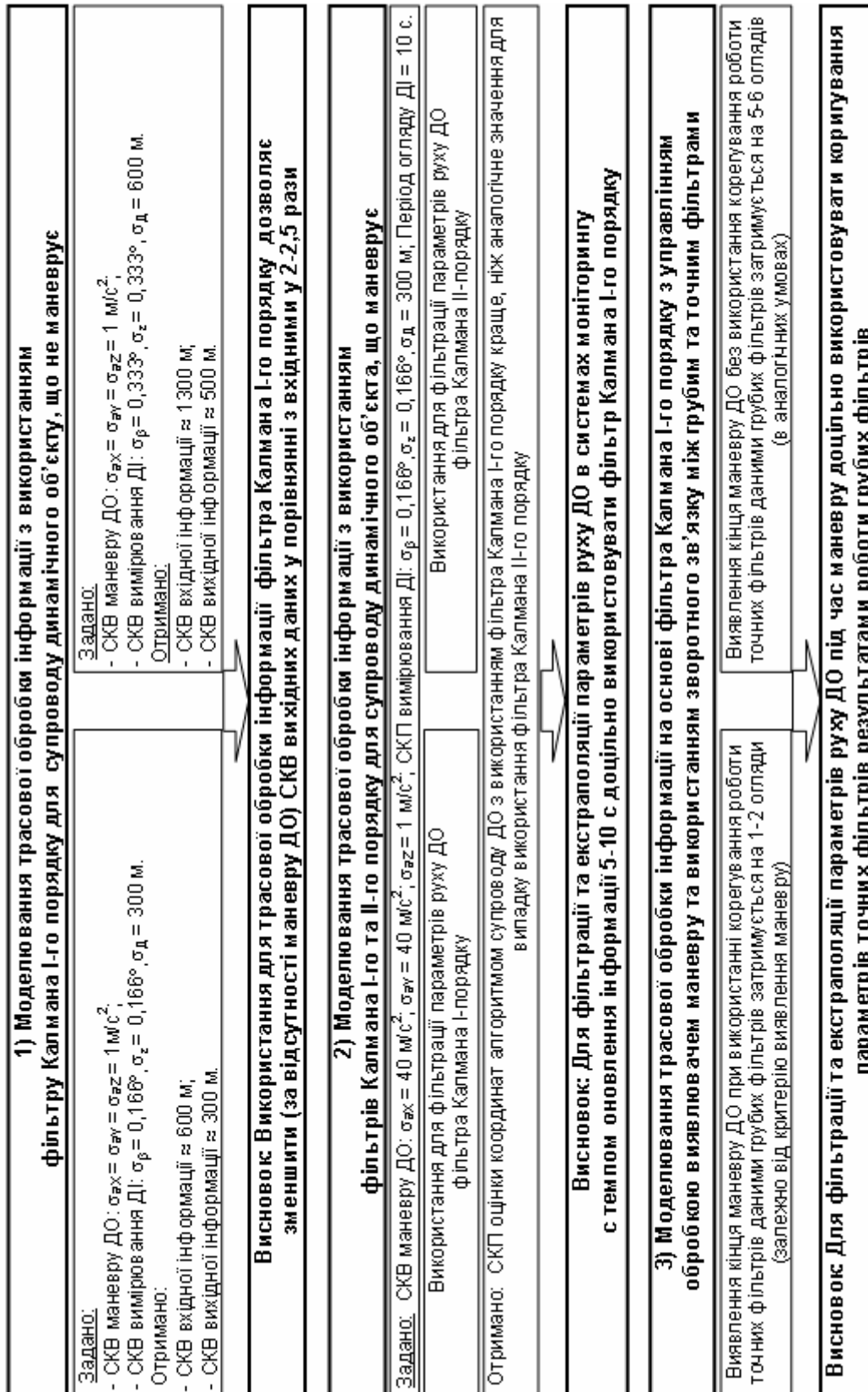


Рис. 1. Моделювання трасової обробки інформації з використанням різних схем фільтрації

$$\hat{Q}_k = \sum_{i=0}^k \eta_i Q_{k-i}, \quad \text{або} \quad \hat{Q}_k = (1-\xi)Q_k + \xi\hat{Q}_{k-1}, \quad (8)$$

де  $\eta_i = (1-\xi)\xi^i$  — вагова функція врахування при згладжуванні вимірених значень курсу на попередніх циклах обробки;  $Q_{k-i}$  ( $Q_k$ ) — вимірених значення курсу ДО на  $k-i$  ( $k$ ) кроці;  $\xi$  — коефіцієнт експоненціального згладжування ( $K_{згл}$ ).

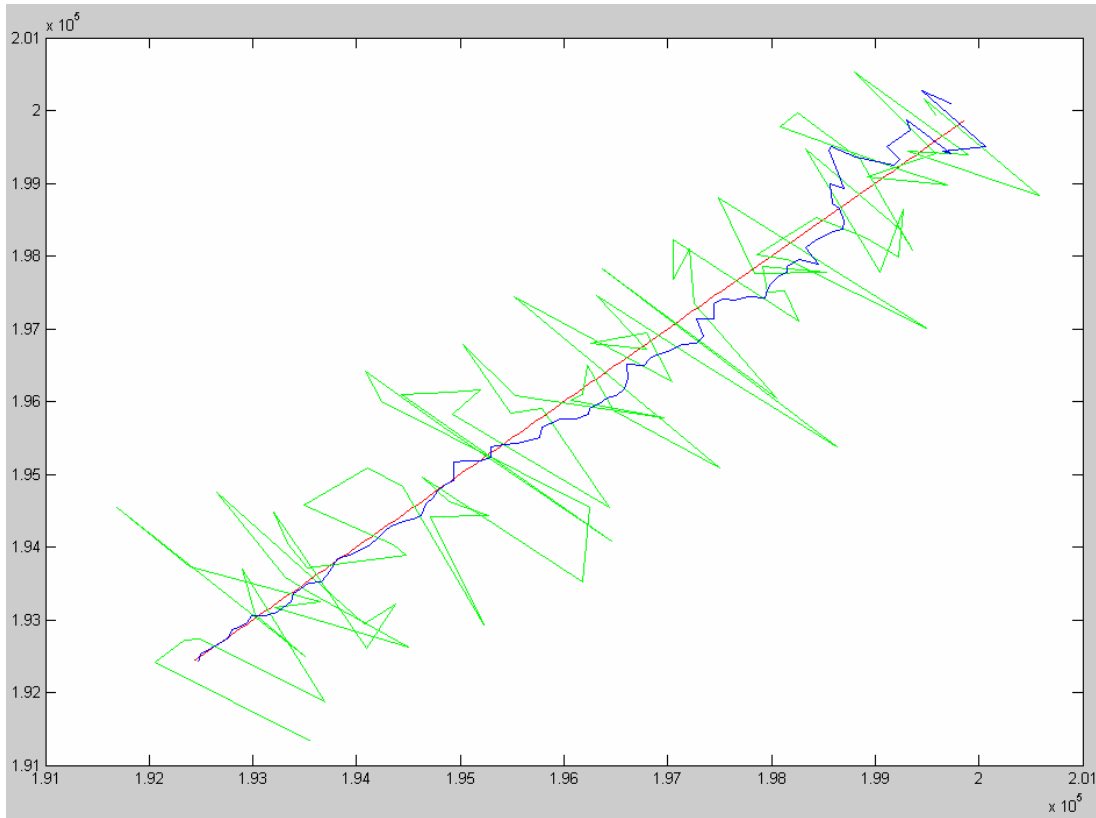


Рис. 2. Результати моделювання руху ДО та його виявлення і супроводження

Перевагою другого запису виразу (8) є відсутність необхідності збереження передісторії оцінювання курсу в явному вигляді (окрім попереднього значення).

Однак, при здійсненні маневру по курсу, ефективність експоненціального згладжування знижується, перш за все за рахунок появи систематичної складової похибки оцінки курсу. На рис. 3 показано результат моделювання згладжування курсу для різних значень коефіцієнта  $\xi$ . Результати згладжування курсу можуть бути суттєво покращені за рахунок використання інформації про маневр (ознаки маневру), що формується точним фільтром площинних координат. На рис. 4 показано результат згладжування курсу, за наявності ознаки маневру (можлива затримка у визначенні кінця маневру не моделювалася). За ознакою «маневр», значення  $\xi$  змінювалося на  $1-\xi$ . З рис. 4 видно, що інертність фільтрації майже відсутня (на відміну від рис. 3). При цьому, СКО згладженого курсу для  $K_{згл} = 0,7$  складає близько  $3,5^\circ$ , а при  $K_{згл} = 0,9$  — біля  $2,5^\circ$  (вхідне значення СКО оцінки курсу складало приблизно  $9^\circ$ ).



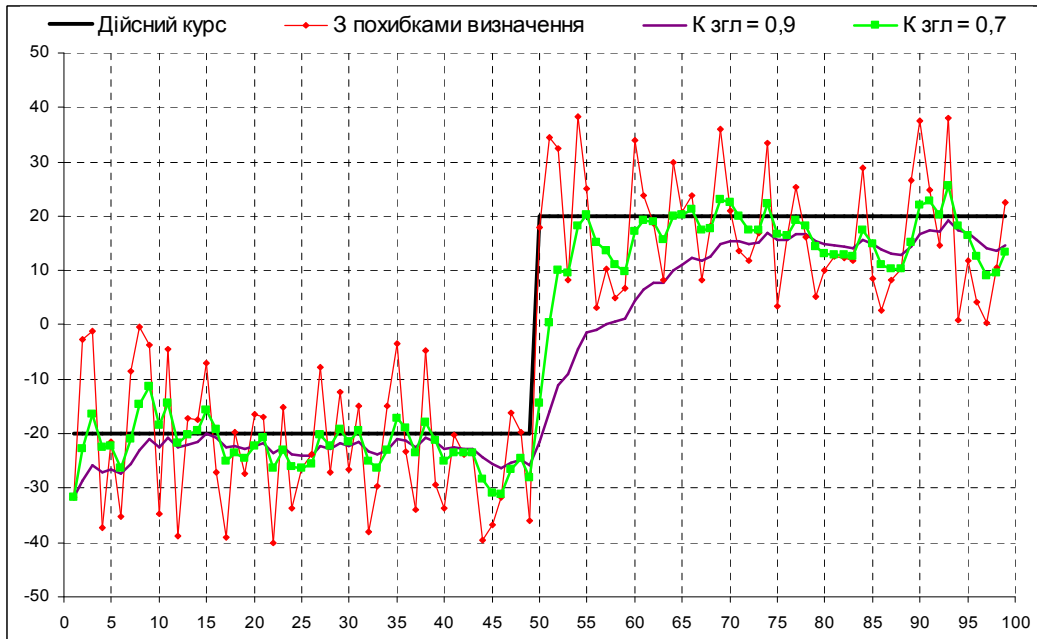


Рис. 3. Результати згладжування курсу ДО, що рухається з інтенсивним маневром

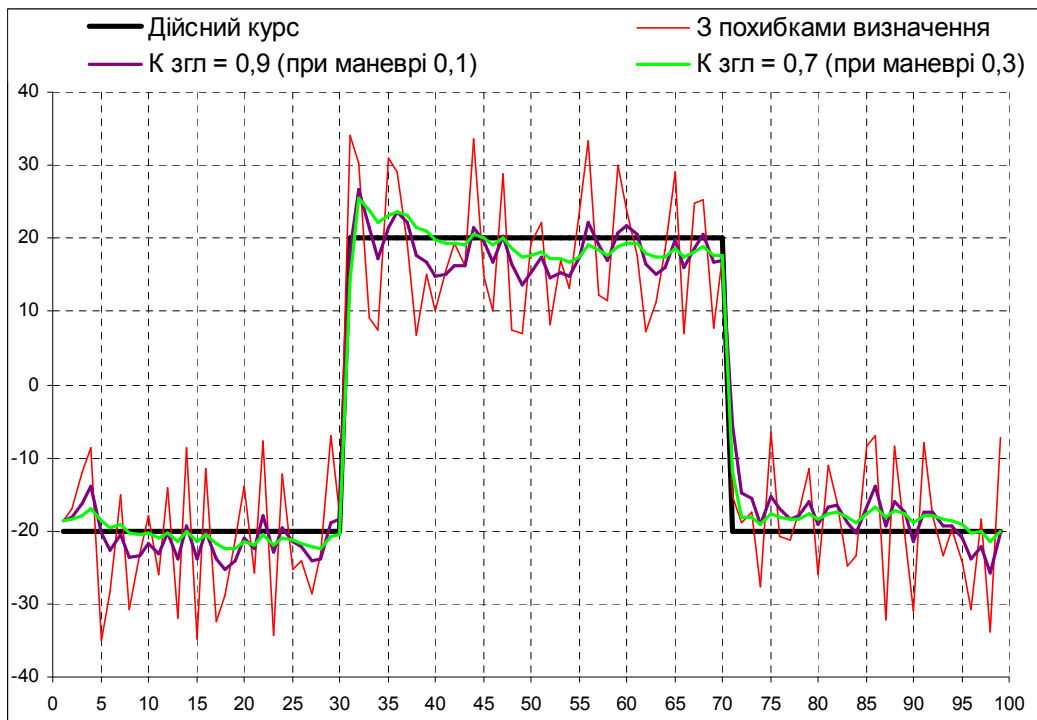


Рис. 4. Результати згладжування курсу ДО, що рухається з інтенсивним маневром із використанням ознаки маневру

Таким чином, виходячи з проведених досліджень, можна зазначити наступне:

— в умовах обмеження обчислювальних ресурсів і відсутності жорстких вимог щодо точності оцінки параметрів ДО траєкторна обробка інформації може здійснюватися з використанням  $\alpha$ ,  $\beta$ -фільтрів;

— у сучасних умовах відсутності жорстких обмежень обчислювальних ресурсів, наявності високих вимог щодо точності оцінки параметрів ДО, траєкторну обробку інформації доцільно (раціонально) здійснювати з використанням точних і грубих фільтрів Калмана I-го порядку з окремою фільтрацією висоти та площинних координат і корегуванням роботи точних фільтрів даними грубих фільтрів на ділянках маневру ДО;

— в умовах, коли швидкість руху ДО є такою, що лінійне пересування об'єкта за інтервал спостереження менше ніж лінійне значення похибок вимірювання координат, використання експоненціального згладжування для згладжування курсу ДО дозволяє значно (приблизно у 3 рази) зменшити СКО згладженого курсу по відношенню до незгладженого і не потребує ні збереження «великої» передісторії, ні складних обчислень. При цьому, інертність процедури фільтрації може бути усунено шляхом використання ознаки маневру, яка формується точним фільтром згладжування площинних координат.

1. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. — М.: Радио и связь, 1986. — 352 с.

2. Жук С.Я. Методы оптимизации дискретных динамических систем со случайной структурой. — Монографія / С.Я. Жук. — К.: НТУУ «КПІ», 2008. — 232 с.

3. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. — К.: Издательство КВиЦ, 2000. — 428 с.: ил.

4. [http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha\\_beta\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_beta_filter).

5. Жук С.Я. Адаптивная фильтрация параметров движения маневрирующего объекта в прямоугольной системе координат / С.Я. Жук, В.И. Кожешкурт, В.В. Юзефович // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2009. — Т. 11, № 2. — С. 12–24.

6. Теоретичні та методологічні основи створення розподілених інформаційно-аналітичних систем (ІАС) моніторингу множини динамічних об'єктів у реальному часі (Звіт про НДР (закл.), шифр «Контроль»). — Книга 2. — К.: ІПРІ НАН України. — 2009. — 222 с. Держ. реєс. № 0107U002592; УДК 004.75:004.9.

Надійшла до редакції 25.11.2010