

А. В. Рудик, к.т.н.

Національний авіаційний університет, м. Київ

ВИКОРИСТАННЯ МЕДІАННОЇ ТА ДІАГНОСТИЧНОЇ ФІЛЬТРАЦІЙ В МОБІЛЬНИХ РОБОТОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСАХ ДЛЯ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

Розглянуто основні типи алгоритмів гарантованої фільтрації, які забезпечують виключення збоїв (помилки, промахів) необхідної кратності в сигналі. Проаналізовано основні параметри та характеристики медіанних і діагностичних фільтрів, а також різновиди їх алгоритмів роботи. Запропоновано використовувати медіанні або діагностичні фільтри при обробці даних з бортової навігаційної системи мобільного робототехнічного комплексу для отримання оцінок навігаційних параметрів, «очищених» від завад. Показано, що результати застосування медіанної фільтрації демонструють її високу ефективність для попередньої обробки сигналів.

Ключові слова: мобільний робототехнічний комплекс, медіанний фільтр, діагностичний фільтр, збій, навігаційні параметри, відлік, помилка, промах.

Вступ

Використання різних алгоритмів фільтрації, які враховують відомі властивості сигналів та завад, є класичним способом боротьби з похибками, завадами та помилками у вимірювальних системах. Якщо вимірювальні дані є гладкими неперервними функціями, заданими масивом відліків, то для їх обробки можна використовувати фільтри, принцип дії яких оснований на усередненні декількох сусідніх відліків. Такий підхід може бути використаний в бортових навігаційних системах мобільних роботів, при цьому гладкість сигналів обумовлюється тим, що місцезнаходження мобільного робота та його навігаційні параметри змінюються плавно.

В бортовому обчислювачі сигнали представлені як масив відліків x_1, x_2, \dots, x_N , що відносяться до рівновіддалених моментів часу. Тому умовою гладкості є нерівність

$$|x_{i+1} - x_i| \leq \varepsilon, \quad (1)$$

яка означає, що сусідні відліки в масиві відрізняються один від одного на малу величину, що не перевищує деякого заданого порогу ε .

Для виключення тих відліків, які спотворені в результаті наявності похибок (збоїв, помилок), може використовуватися зазначена вище близькість сусідніх відліків вимірювальних сигналів. При цьому обробка сигналу проводиться у відповідності з структурною схемою рис. 1.

На вхід фільтра з буфера 1 послідовно подаються відліки сигналу x_1, x_2, \dots, x_N , які обробляються відповідно до вибраного алгоритму фільтрації та перетворюються у вихідну

послідовність $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_N$. Одним з найбільш простих алгоритмів фільтрації є алгоритм ковзного середнього (*moving average, MA*):

$$\hat{x}_{MA,i} = \frac{x_i + x_{i-1} + \dots + x_{i-k+1}}{k}, \quad (2)$$

де k – довжина «вікна», що ковзає по відлікам сигналу (фільтр з кінцевою пам'яттю або з кінцевою імпульсною характеристикою).



Рисунок 1 – Структурна схема обробки інформативного сигналу

Довільний фільтр з кінцевою пам'яттю описується співвідношенням

$$\hat{x}_i = f(x_i + x_{i-1} + \dots + x_{i-k+1}). \quad (3)$$

Задача синтезу фільтра, що задовольняє заданим вимогам, зводиться до вибору функції f . Функція ковзного середнього (2) відповідає функції середнього арифметичного. Будь-якій з функцій оцінювання [1] можна співставити алгоритм фільтрації, що визначається співвідношенням (3).

За видом оцінок алгоритми діляться на сім груп:

- класичні середні (середні арифметичне, геометричне, гармонічне та квадратичне);

- лінійні оцінки (зважене середнє арифметичне, марківська оцінка, оцінка за методом збиткових змінних);

- квазілінійні оцінки (принципи довіри та недовіри двом найближчим значенням вимірювань, вибіркової медіани);

- нелінійні оцінки (середні степеневе і логарифмічне, узагальнення середнього геометричного);

- оцінки з відбраківкою двох значень вимірювань (вибір найбільшого, вибір найменшого, вибір медіани, відкидання двох найближчих, відбраківка на основі алгоритмів діагностики методом збиткових змінних);

- оцінки з відбраківкою одного значення вимірювань та усереднення інших (відкидання найбільшого, відкидання найменшого, відкидання медіани, відкидання за деяким критерієм);

- суперпозиції або комбінації оцінок (середнє арифметичне від 4 класичних середніх та ін.).

Використовуючи формулу середнього гармонічного, отримуємо фільтр, що описується як

$$\hat{x}_i = \frac{3x_i x_{i-1} x_{i-2}}{x_i x_{i-1} + x_i x_{i-2} + x_{i-1} x_{i-2}},$$

а алгоритм фільтрації називають алгоритмом ковзного середнього гармонічного.

Найпростіший алгоритм гарантованої фільтрації оснований на тому, що вихідний відлік фільтра визначається як півсума максимального і мінімального з трьох вхідних відліків (при цьому медіанне значення відкидається). Розглянуті сім груп функцій оцінювання породжують порядку семидесяти алгоритмів фільтрації, що забезпечують обробку гладких сигналів. Найбільш поширеними алгоритмами є медіанний та діагностичний, що забезпечують виключення збоїв (помилки, промахів) необхідної кратності в сигналі.

Постановка задачі

В статті необхідно:

1) проаналізувати основні параметри і характеристики медіанних та діагностичних фільтрів, а також різновиди їх алгоритмів роботи;

2) розглянути можливість використання медіанних або діагностичних фільтрів при обробці даних з бортової навігаційної системи мобільного робототехнічного комплексу (МРТК) для отримання оцінок навігаційних параметрів, «очищених» від завад.

Основна частина

Алгоритм медіанної обробки при фільтрації сигналів перетворюється в алгоритм ковзної

медіани, який при $k = 3$ описується як

$$\hat{x}_i = \text{med}(x_i, x_{i-1}, x_{i-2}), \quad i = \overline{3, N}.$$

За умовами симетрії цю формулу зручніше переписати у вигляді

$$\hat{x}_i = \text{med}(x_{i+1}, x_i, x_{i-1}), \quad i = \overline{2, N}. \quad (4)$$

Це означає, що у вихідному масиві даних послідовно розглядаються k сусідніх відліків, а оцінку \hat{x}_i є середній відлік (рис. 2).

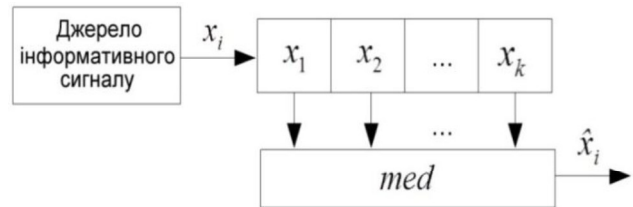


Рисунок 2 – Структурна схема медіанного фільтра з довжиною «вікна» k , нечутливого до n збоїв

Важливою властивістю алгоритму ковзної медіани є те, що він відбраковує відліки, спотворені поодинокими збоями (промахами, помилками). Такі відліки замінюються сусідніми відліками (тим з них, що ближче за своїм значенням). Тому алгоритм забезпечує нечутливість до поодиноких збоїв (помилки, промахів), тобто має властивість робастності.

Медіанні фільтри легко реалізуються технічно і використовуються для ефективної боротьби зі збоями (помилками, промахами) будь-якої кратності. Вибираючи довжину «вікна» $k = 2n + 1$, отримуємо оцінку, нечутливу до n збоїв.

Медіанний фільтр має ряд цікавих властивостей, розглянутих в роботах [2 - 6]. Основними з них є такі.

1. Критерій оптимальності фільтра [2].

Медіанний фільтр, як і при звичайній оцінці результатів вимірювань, формує оцінку, що задовольняє модульний критерій оптимальності. При довжині «вікна» $k = 3$ критерій має вигляд

$$J = |x_{i+1} - \hat{x}_i| + |x_i - \hat{x}_i| + |x_{i-1} - \hat{x}_i|. \quad (5)$$

Як видно з рис. 2, оцінка \hat{x}_i , обчислена за співвідношенням (4), забезпечує такому критерію мінімальне значення.

При довільній довжині «вікна» $k = 2n + 1$ формула (5) перетворюється в суму k доданків:

$$J = \sum_{m=-n}^n |x_{i+m} - \hat{x}_i|. \quad (6)$$

Мінімум такого критерію досягається при

$$\hat{x}_i = \text{med}(x_{i-n}, \dots, x_{i+n}).$$

2. Статистичні властивості фільтра [2, 3].

Аналіз статистичних властивостей фільтра зазвичай проводять при подачі на його вхід різних випадкових вхідних сигналів та дослідженні ймовірнісних характеристик вихідного сигналу. Якщо на вхід медіанного фільтра подати сигнал, рівномірно розподілений на інтервалі $[-1, 1]$, то графік густини розподілу ймовірностей вихідного сигналу буде мати дзвіноподібний вигляд, близький за формою до гаусівської кривої. Даний результат пояснюється тим, що медіанний фільтр відкидає відліки з великою амплітудою, пропускаючи на вихід відліки з малою та середньою амплітудами.

3. Нелінійний характер фільтра [4].

Нелінійний характер медіанного фільтра проявляється в тому, що він не спотворює фронти імпульсів на відміну від будь-якого лінійного фільтра. Алгоритмічно його нелінійність проявляється у використанні для реалізації функції *med* нелінійної операції сортування відліків інформативного сигналу, що потрапили у «вікно» фільтра. Обчислювальна складність такої операції збільшується при збільшенні довжини «вікна», що підвищує економічність алгоритмічної реалізації фільтра.

4. Кореневі сигнали фільтра [5].

Важливою характеристикою фільтра є його функціонування при відсутності завад. За цією ознакою всі фільтри можна розділити на два класи. До першого відносяться фільтри, які не вносять спотворень у вхідний сигнал, а до другого – такі, що вносять деякі спотворення (будь-який лінійний фільтр змінює форму вхідного сигналу).

Медіанний фільтр відноситься до другого класу, тому що в загальному випадку він змінює вхідний сигнал. В першу чергу це відбувається з екстремальними та близькими до них точками сигналу, тобто при проходженні синусоїдального сигналу через медіанний фільтр вершини хвиль синусоїди стають більш плоскими.

Існують сигнали, що називаються кореневими, які не змінюються при проходженні через медіанний фільтр, оскільки є коренями рівняння $\text{med}(x) - x = 0$, де x та $\text{med}(x)$ – відповідно вхідний і вихідний сигнали фільтра.

Кореневими сигналами медіанного фільтра є одиничний «стрибок» (функція Хевісайда), лінійно-наростаючий сигнал, будь-який монотонний сигнал, а також прямокутний імпульс за умови, що його тривалість більше половини довжини «вікна» фільтра. Такі сигнали

та їх комбінації про ходять через медіанний фільтр без спотворень.

5. Узагальнений медіанний фільтр [6].

Класичний медіанний фільтр оптимізує критерій, що визначається співвідношенням (6). Даний критерій допускає подвійне узагальнення:

- його можна записати як

$$J = \sum_{m=-n}^n |a_m x_{i+m} - \hat{x}_i|,$$

де a_m – вагові коефіцієнти, за допомогою яких враховується «важливість» деяких відліків; даному критерію відповідає клас зважених ковзних медіанних фільтрів;

- кожний додаток у співвідношенні (6) можна піднести до деякого позитивного степеня γ , що приведе до критерію

$$J = \sum_{m=-n}^n |x_{i+m} - \hat{x}_i|^\gamma, \quad (7)$$

при цьому при $\gamma = 1$ отримуємо класичний медіанний фільтр; при $\gamma = 2$ – квадратичний критерій, для якого оптимальною оцінкою є ковзне середнє арифметичне (2); при $\gamma \rightarrow \infty$ критерій (7) перетворюється в чебишевський з оптимальною оцінкою у вигляді півсуми мінімального та максимального відліків у «вікні» (така оцінка є гарантованою і мінімізує максимально допустиму похибку); при $\gamma < 1$ функція J стає багатоекстремальною, а всі її мінімуми знаходяться в точках з відліками вхідного сигналу.

Вибір значення γ та, як наслідок, типу фільтра визначається поставленою задачею, зокрема, характером сигналу та завад.

Діагностичним є фільтр для обробки сигналів, алгоритм роботи якого оснований на відбракуванні при діагностиці за методом збиткових змінних. Найпростіший діагностичний фільтр реалізується при аналізі сусідньої пари відліків, тобто використанні «вікна» довжиною два відліки, та перевірці виконання умови [5]

$$\Delta_i = |x_i - x_{i-1}| \leq \varepsilon, \quad (8)$$

де ε – фіксований поріг, що визначається «гладкістю» вхідного сигналу.

Якщо умова (8) виконується, то поточний вхідний відлік пропускається на вихід фільтра ($\hat{x}_i = x_i$), а в іншому випадку вихід фільтра блокується доти, доки не буде виконуватися умова (8). На інтервалі блокування вихідний сигнал фільтра може довизначатися різними

способами (наприклад, екстраполяцією нульового порядку, тобто останнім вірним значенням $\hat{x}_i = x_{i-1}$). Відповідний алгоритм наведений на рис. 3, а.

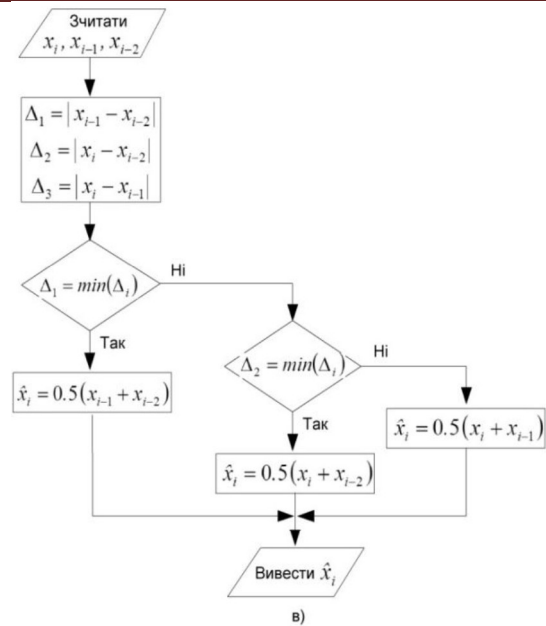
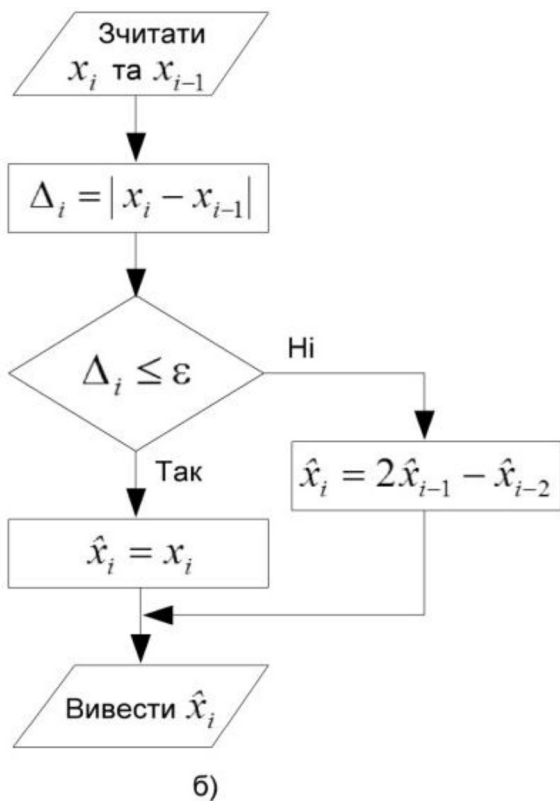
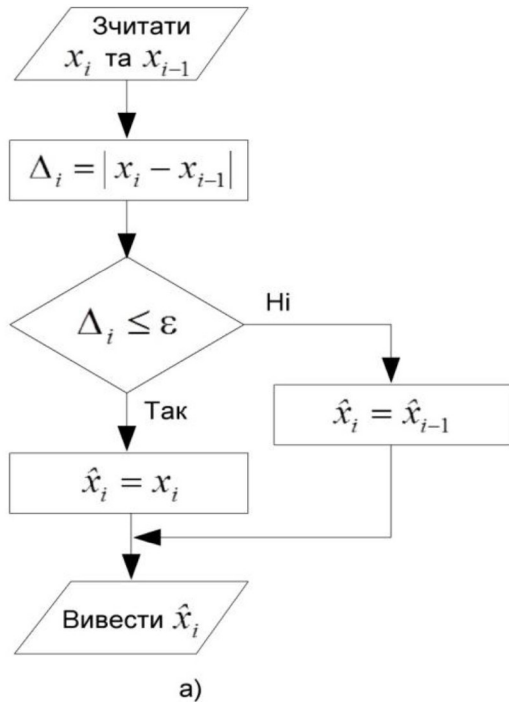


Рисунок 3 – Алгоритми роботи діагностичних фільтрів: з екстраполяцією нульового (а) та першого (б) порядків; в) безпороговий діагностичний фільтр з довжиною вікна $k = 3$

Також можна використовувати екстраполяцію першого або другого порядків, однак для цього потрібно збільшувати довжину вікна фільтра. Алгоритм, що використовує екстраполяцію першого порядку, наведений на рис. 3, б.

Таким чином, діагностичний фільтр при мінімальній довжині вікна $k = 2$ дозволяє виключати збої (помилки, промахи) довільної кратності, що є його перевагою перед медіанним фільтром. Другою перевагою фільтра є те, що він не вносить спотворень в сигнал, вільний від збоїв (відноситься до першого класу фільтрів). Тому сигнал будь-якої форми, що задовольняє умову гладкості (8), є кореневим для діагностичного фільтра. Ці переваги досягаються за рахунок використання додаткової інформації про поріг ϵ , яка не потрібна у випадку медіанного фільтра.

Однак цей недолік можна виключити при переході до безпорогового діагностичного фільтра, для якого при довжині вікна $k = 3$ формують три контрольні сигнали, які при відсутності збоїв всі будуть мати малу величину [1]:

$$\Delta_1 = |x_{i-1} - x_{i-2}|, \Delta_2 = |x_i - x_{i-2}|, \Delta_3 = |x_i - x_{i-1}|.$$

Поява однократного збою спотворить один з відліків та приведе до збільшення значень двох з трьох контрольних сигналів. Індекс контрольного сигналу, який залишився малим, збігається з номером спотвореного відліку. Такий відлік відкидається, а оцінка формується

на основі двох відліків, що залишилися (як їх середнє арифметичне, середнє гармонічне або ін.).

Тому безпороговий діагностичний фільтр з довжиною «вікна» $k = 3$, як і медіанний фільтр, ефективно виключає однократні збої. Алгоритм роботи такого фільтра наведений на рис. 3, в. Однак при відсутності збоїв такий фільтр, як і медіанний, спотворює вхідний сигнал.

Розглянуті типи фільтрів, зокрема медіанний, пропонується використовувати при обробці даних з бортової навігаційної системи МРТК. Структурна схема такої обробки наведена на рис. 4. В ній джерелом первинної вимірювальної інформації є безплатформна інерціальна навігаційна система (БІНС), на виході якої формуються оцінки таких навігаційних параметрів:

- координати: широта φ , довгота λ та висота h ;

- компоненти швидкості: східна $\dot{\lambda} = \frac{V_{Zg}}{R \cos \varphi}$

західна $\dot{\varphi} = \frac{V_{Xg}}{R}$ та вертикальна $\dot{h} = V_{Yg}$, де R – радіус Землі, V_{Xg}, V_{Yg}, V_{Zg} – проекції вектора швидкості на осі OX_g, OY_g та OZ_g ;

- кути орієнтації: рискання ψ , тангажу ϑ та крену γ .



Рисунок 4 – Структурна схема обробки сигналів БІНС мобільного робототехнічного комплексу

На оцінки накладаються завади двох типів – високого рівня (викиди, пропадання сигналу) та низького рівня (інструментальні та інші види похибок). Для боротьби з ними використовується двоетапна процедура обробки. На першому етапі виключаються завади високого рівня, для чого використовується блок медіанних фільтрів. На другому етапі для боротьби з завадами низького рівня використовується фільтр Калмана, на виході якого отримують оцінки навігаційних параметрів, «очищені» від завад.

Для ілюстрації такого способу обробки на рис. 5 та рис. 6 наведені результати медіанної

фільтрації сигналів h (висота) та $\dot{h} = V_{Yg}$ (вертикальна швидкість), при побудові яких використані реальні записи сигналів БІНС, отримані під час льотних випробувань [1]. На верхніх графіках цих рисунків наявна значна кількість помилок високого рівня, що викликані регулярними пропаданнями сигналів через наявність вібрацій, недостатньо надійні контакти та ін.

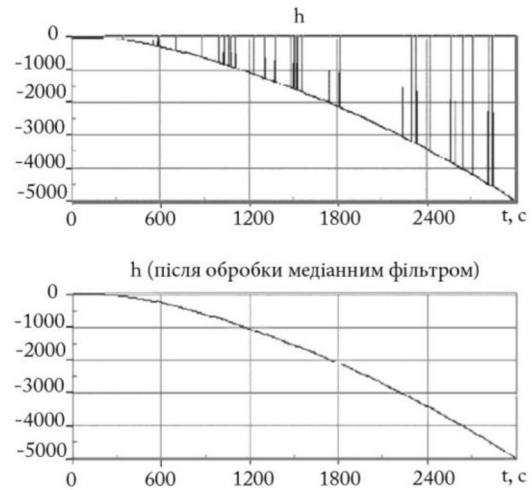


Рисунок 5 – Медіанна фільтрація сигналу за каналом висоти

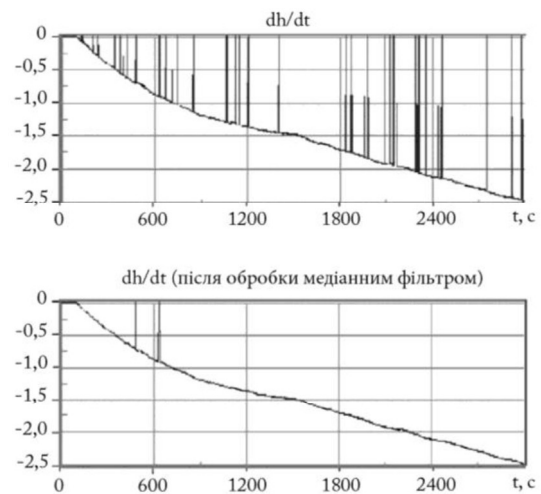


Рисунок 6 – Медіанна фільтрація сигналу за каналом вертикальної швидкості

Нижні графіки на рис. 5 та рис. 6 є результатами медіанної фільтрації. Медіанні фільтри використовують «вікно» довжиною $k = 3$, що дозволяє виключати поодинокі збої. В результаті проведеної фільтрації сигнал за каналом висоти виявився повністю «очищеним» від помилок високого рівня, а в сигналі за каналом вертикальної швидкості виключені всі помилки, крім двох (для їх виключення необхідно використовувати або додаткову

фільтрацію, або медіанний фільтр з «вікном» довжиною $k = 5$. Результати, наведені на рис. 5 та рис. 6, ілюструють високу ефективність медіанної фільтрації для попередньої обробки сигналів, які надходять від вимірювальних перетворювачів.

Висновки

1. Розглянуто основні типи алгоритмів гарантованої фільтрації і показано, що найбільш поширеними алгоритмами є медіанний та діагностичний, які забезпечують виключення збоїв (помилки, промахів) необхідної кратності в сигналі.

2. Проаналізовано основні параметри та характеристики медіанних і діагностичних фільтрів, а також різновиди їх алгоритмів роботи залежно від типу екстраполяції та наявності або відсутності порогу.

3. Запропоновано використовувати медіанні або діагностичні фільтри при обробці даних з бортової навігаційної системи мобільного робототехнічного комплексу для отримання оцінок навігаційних параметрів, «очищених» від завад.

4. Показано, що результати застосування медіанної фільтрації демонструють її високу ефективність для попередньої обробки сигналів, які надходять від вимірювальних

перетворювачів.

Список використаних джерел

1. Мироновский Л. А., Слаев В. А. Алгоритмы оценивания результата трех измерений. – СПб.: Професионал, 2010. – 192 с. ISBN 978-5-91259-041-2.
2. Матасов А. И. Метод гарантирующего оценивания. – М.: МГУ, 2009. – 100 с.
3. Романов В. Н. Теория измерений. Точность средств измерений: Учебное пособие. – СПб.: СЗТУ, 2003. – 154 с.
4. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 316 с.
5. Степанов О. А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 496 с.
6. Astola J., Neuvo Y. An Efficient Tool for Analyzing Weighted Median Filters // IEEE Trans. CAS II: Analog and Digital Processing. 1994. V. 41, № 7. – P. 487-489.

Надійшла до редакції 20.05.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Квасніков В. П.,
Національний авіаційний університет, м. Київ.

А. В. Рудык, к.т.н.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕДИАННОЙ И ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИЙ В МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Рассмотрены основные типы алгоритмов гарантированной фильтрации, которые обеспечивают устранение сбоев (ошибок, промахов) необходимой кратности в сигнале. Проанализированы основные параметры и характеристики медианных и диагностических фильтров, а также разновидности их алгоритмов работы. Предложено использовать медианные или диагностические фильтры при обработке данных с бортовой навигационной системы мобильного робототехнического комплекса для получения оценок навигационных параметров, «очищенных» от помех. Показано, что результаты применения медианной фильтрации демонстрируют её высокую эффективность для предварительной обработки сигналов.

Ключевые слова: мобильный робототехнический комплекс, медианный фильтр, диагностический фильтр, сбой, навигационные параметры, отсчёт, ошибка, промах.

A. V. Rudyk, PhD

USE MEDIAN AND DIAGNOSTIC FILTRATIONS IN MOBILE ROBOTIC SYSTEMS FOR PRE-PROCESSING SIGNALS

The main types of guaranteed filtering algorithms, which ensure the elimination of failures (errors, near misses) the necessary multiplicity of the signal, are considered. The basic parameters and characteristics of the median filter and diagnostic, as well as their variations of algorithms are analyzed. It is proposed to use the median or diagnostic filters in the processing of data from on-board mobile robot navigation system for navigating the parameter estimates, «peeled» from interference. It is shown that the application of median filtering results demonstrate high efficiency for its pre-processing.

Keywords: mobile robotic system, median filter, a diagnostic filter, failure, navigation options, countdown, error, blunder.