

А. А. Гризо, І. М. Невмержицький, О. А. Малишев, Б. В. Петролюк

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕДУР ВЕКТОРНОЇ МЕДІАННОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ В РАДІОЛОКАЦІЙНІЙ СТАНЦІЇ РАДІОТЕХНІЧНИХ ВІЙСЬК

У статті наведено опис декількох варіантів обробки векторних сигналів за допомогою процедур векторної медіанної фільтрації (ВМФ). Розглянуто відомі варіанти алгоритму селекції, які дозволяють значно зменшити потік імпульсних завад, але призводять до спотворення спектральних складових вхідного процесу, та модифікований алгоритм, оснований на введенні класифікатора стану. Для дослідження ефективності фільтрів проведено імітаційний експеримент, у ході якого отримано оцінки статистичних показників процесу на виході фільтрів. Показано, що використання модифікованого векторного медіанного фільтра (МВМФ) забезпечує необхідний рівень селекції імпульсних завад, не спричиняючи суттєвого спотворення спектральних складових процесу.

Постановка проблеми. Характерною тенденцією розвитку сучасних систем обробки радіолокаційної інформації є значне підвищення вимог до ефективності та якості виявлення корисного сигналу за наявності шумів різного походження і навмисно створених завад.

Таким чином, постає задача фільтрації імпульсних перешкод на нестационарному фоні (наприклад, віддзеркалень від місцевих предметів). Задача ускладнюється ще й тим, що подавлення кожної складової завади передбачає виконання взаємовиключних операцій. У [1–3] запропоновано ряд алгоритмів, які забезпечують згладжування нестационарної послідовності з усуненням локальних викидів. Наголошується, що низкою переваг володіє клас нелінійних алгоритмів обробки сигналів, які оснований на швидких алгоритмах обчислення локальних гістограм розподілу та їх характеристик. Вони є локально-адаптивними та достатньо простими у реалізації. Одним з різновидів таких алгоритмів є медіанна фільтрація.

У багатьох випадках застосування медіанного фільтра виявляється більш ефективним порівняно з лінійними фільтрами, оскільки процедури лінійної обробки є оптимальними при рівномірному або гауссовому розподілі завад, що в реальних сигналах може бути далеко не так. Однак характерною рисою медіанного фільтра є його нелінійність, ця властивість призводить до спотворення спектральних складових корисного сигналу, що, у свою чергу, може призвести до погіршення ефективності подальших етапів обробки.

Огляд останніх досліджень і публікацій. У роботах [1, 2] поняття ВМФ визначається таким чином. Нехай F являє собою векторний сигнал, що містить k -компонент, тобто сигнал у кожний момент часу описується k -компонентним вектором. W – вікно кінцевого розміру n (апертура фільтра). Відліки сигналу (вектора) у вікні W позначимо як $F_i, i = 0, 1, \dots, n-1$.

Позначимо відстань між двома векторами F_i, F_j як $\rho(F_i, F_j)$, тоді скалярна величина

$$R_i = \sum_{j=1}^n \rho(F_i, F_j) \quad (1)$$

є відстанню за вікном обробки, пов'язаним з вектором (визначеним щодо вектора) F_i .

Якщо $R_0 \leq R_1 \leq \dots \leq R_{(n-1)}$, то мається на увазі, що й відповідні вектори співвідносяться в такий же спосіб $F_0 \leq F_1 \leq \dots \leq F_{(n-1)}$ [1]. Як відстань $\rho(F_i, F_j)$ широко використовуються різні норми (L) векторного простору.

Наприклад, у ВМФ [2] для обчислення відстані R_i (1) використовується норма L_2 (евклідова відстань):

$$\rho(F_i, F_j) = L_2(F_i, F_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^l (F_i^{<k>} - F_j^{<k>})^2}. \quad (2)$$

Таким чином, відгуком ВМФ $F^{BM\Phi}$ є вектор F_k такий, що для будь-яких $i = 0, \dots, n-1$:

$$\sum_{j=0}^{n-1} \rho(F_k, F_j) < \sum_{j=0}^{n-1} \rho(F_i, F_j), k \neq i. \quad (3)$$

Як подальший розвиток вводиться поняття векторного медіанного фільтра напрямку (ВМФН) [4], де як міра відстані (2) обирається кут між двома векторами F_i, F_j , який обчислюється за формулою:

$$\alpha(F_i, F_j) = \arccos \left(\frac{f_{1,i} \cdot f_{1,j} + f_{2,i} \cdot f_{2,j}}{\sqrt{f_{1,i}^2 + f_{2,i}^2} \cdot \sqrt{f_{1,j}^2 + f_{2,j}^2}} \right), 0 \leq \alpha(F_i, F_j) \leq \pi, \quad (4)$$

де $f_{1,i}, f_{2,i}$ – компоненти вектора F_i , а $f_{1,j}, f_{2,j}$ – вектора F_j .

Скалярна величина

$$A_i = \sum_{j=0}^{n-1} \alpha(F_i, F_j), i, j \in 0..n-1 \quad (5)$$

є абсолютна кутова відстань за вікном обробки, що пов'язана з поточним вектором (визначена щодо вектора) F_i . Як вихідне значення фільтра використовується вектор, відповідний до мінімальної абсолютної кутової відстані за вікном обробки $\min\{A_i\}, i \in 0..n-1$. Ранжована за величиною множина $\{A_i\}, i \in 0..n-1$ визначена як

$$A_0 \leq A_1 \leq \dots \leq A_{(n-1)}. \quad (6)$$

Таким чином, подібно до ВМФ, відгуком ВМФН є такий вектор $F^{ВМФН}$, що для будь-яких $i = 0, \dots, n-1$

$$\sum_{j=0}^{n-1} \alpha(F^{ВМФН}, F_j) < \sum_{j=0}^{n-1} \alpha(F_i, F_j), i \in 0..n-1. \quad (7)$$

Як подальший розвиток вводиться поняття розширеного векторного медіанного фільтра напряму (РВМФН) [4]. Як вихідне значення РВМФН використовується набір векторів, відповідних першим k -значенням з впорядкованого ряду (6). Вихідний набір векторів $F_0^{РВМФН}, F_1^{РВМФН}, \dots, F_k^{РВМФН}$ має приблизно рівний напрям у векторному просторі та може бути використаний як вхідні дані для додаткового фільтра, наприклад, розглянутого ВМФ або ВМФН. Приклад такої каскадної побудови фільтра зображено на рис. 1.

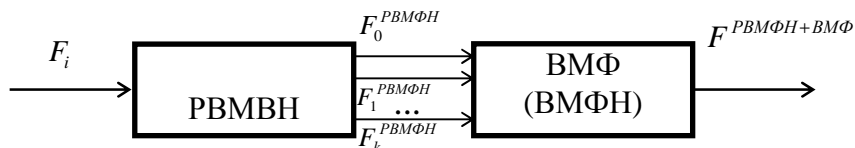


Рис. 1. Структура каскадного ВМФ

Формулювання завдання дослідження. Таким чином, є доцільним дослідити можливості використання різних варіантів ВМФ для селекції імпульсних завад при обробці когерентних сигналів у радіолокаційній станції радіотехнічних військ. Цікавою є числова оцінка: наскільки обраний фільтр спотворює вхідну послідовність та який при цьому забезпечується ступінь селекції імпульсної завади. У зв'язку із труднощами математичного опису нелінійних операцій у фільтрі аналіз доцільно проводити шляхом імітаційного моделювання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для деяких застосувань медіанна фільтрація може виявитися неприпустимою. Наприклад, нелінійні операції до процедури селекції рухомих цілей значно знижують її ефективність. Введемо класифікатор C , який діє на поточне вікно W і за деяким правилом розподіляє його елементи за класами, що належать до множини класів M [5].

Змінна стану $s_i = C(F_i, W)$ – це результат застосування вказаного класифікатора. Її значення застосовують для управління операцією фільтрації, визначеної як

$$F_i^{МВМФ} = \alpha(s_i) \cdot F_i + \beta(s_i) \cdot F_i^{ВМФ}, \quad (8)$$

де $F_i^{МВМФ}$ – вихідний сигнал модифікованого ВМФ (МВМФ), $\alpha(s_i), \beta(s_i)$ – скалярні коефіцієнти залежні від поточного значення змінної s_i .

Блок-схема фільтра зображена на рис. 2.

Фільтр можна спростити, якщо вважати, що змінна стану s_i набуває тільки два значення: 1 – якщо поточний відлік класифікується як ушкоджений імпульсною завадою, 0 – якщо ні. У такий спосіб піддаватися фільтрації ВМФ будуть тільки ті відліки, які були класифіковані як уражені імпульсною завадою, інша частина пройде без змін.

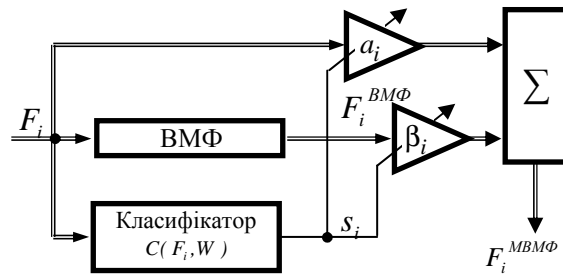


Рис. 2. Блок-схема модифікованого ВМФ

Як функція змінної стану у [2, 5] обрана евклідова відстань (2). Змінна стану визначається як

$$s_i = \begin{cases} 1, \rho(F_i, F_i^{BMF}) \geq C; \\ 0, \rho(F_i, F_i^{BMF}) < C. \end{cases} \quad (9)$$

Величина C є граничним значенням для відстані $\rho(F_i, F_i^{BMF})$, а її значення необхідно задавати, виходячи із числових характеристик шуму. Для випадку n -мірного векторного сигналу F_i з незалежним нормальним розподілом з дисперсією σ^2 й нульовим математичним сподіванням компонент для розглянутих норм L_1, L_2 рекомендуються відповідні значення C_1, C_2 [2]:

$$C_1 = 3 \cdot m \cdot \sigma; \quad (10)$$

$$C_2 = 3 \cdot \sqrt{m} \cdot \sigma. \quad (11)$$

Для перевірки ефективності розглянутих варіантів медіанної фільтрації було проведено імітаційне моделювання. Для цього було створено імітаційну модель, яка дозволяє досліджувати вплив на якість обробки сигналів виду та параметрів обраного фільтра селекції. Основу імітаційної моделі становить відтворення процесів, що відбуваються в тракці обробки сигналів, шляхом формування масивів комплексних відліків сигналів і завад із заданими статистичними характеристиками на основі генерації випадкових величин за допомогою програмних датчиків. В алгоритмі моделювання в цьому випадку використовуються операції, які описуються детермінованою і стохастичною залежністю.

Спрощена структурна схема моделі, що наведена на рис. 3, відображає порядок динамічної імітації часового розподілу сигналів і завад. Послідовність формування сигнально-завадової обстановки подана у вигляді чотирьох етапів (рис. 3):

етап формування початкових даних;

етап формування комплексних відліків сигналів і завад;

етап обробки даних;

етап відображення й аналізу статистичних характеристик спостережуваних процесів.

Використовуючи програмний датчик нормальнорозподілених випадкових чисел (ДНРВЧ) модель формує комплексні обвідні власних шумів, пасивних завад та сигналу.

заданого рівня ($\sigma_{пз}^2$, σ_c^2) з різним доплерівським зсувом частоти ($F_{пз}$, F_c) та різною кореляційною функцією ($r_{пз}(nT)$, $r_c(nT)$). До вказаних компонент додаються відліки імпульсної завади, для генерації яких використовувалася узагальнена ймовірнісна модель флуктуацій амплітуди відліків нестационарної шумової завади, запропонована у [8].

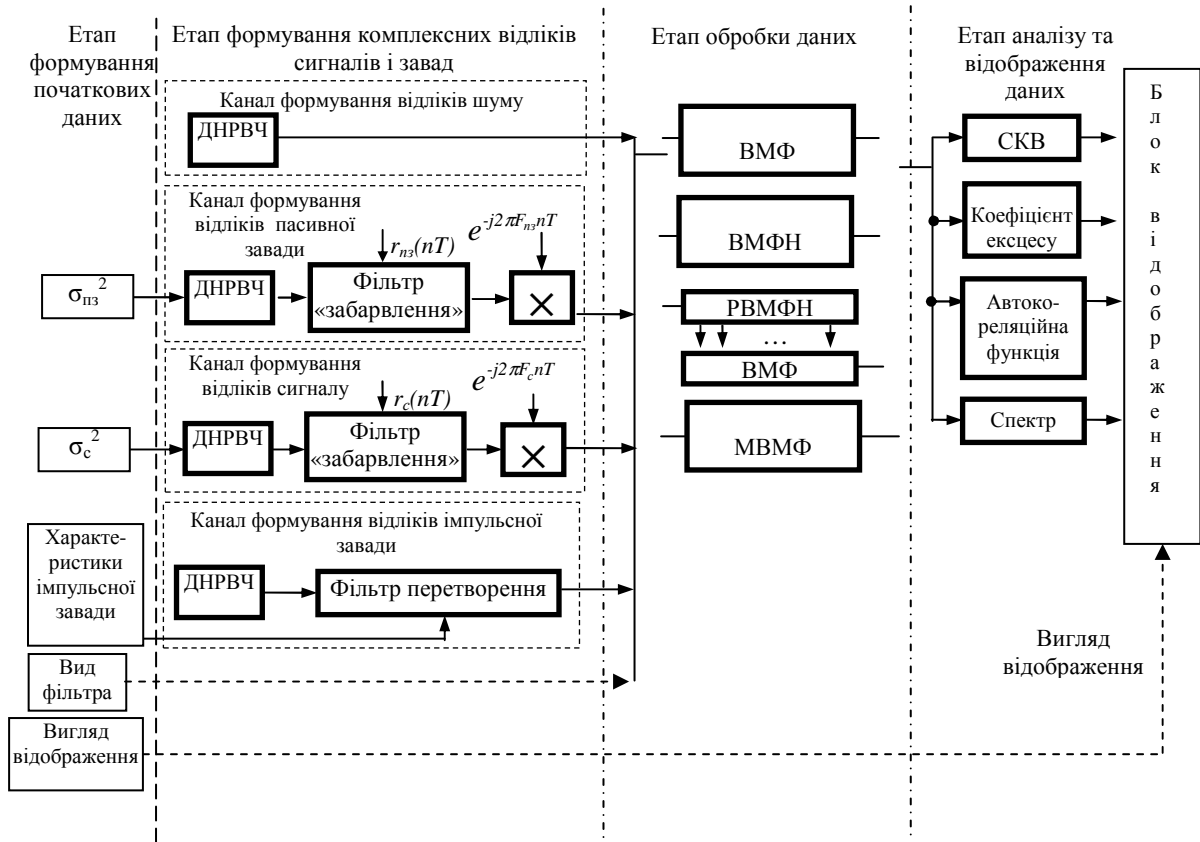


Рис. 3. Структурна схема розробленої імітаційної моделі

Процеси обробляються з використанням одного з розглянутих фільтрів (ВМФ, ВМФН, РВМФН, МВМФ), поданих відповідними блоками на структурній схемі моделі. Обробка проводилась для однакових значень апертур.

Сформовані відліки надходять до відповідного фільтра обробки (етап обробки даних) та далі до блоків аналізу (оцінки середньоквадратичного відхилення (СКВ), коефіцієнта ексцесу, автокореляційної функції, спектра). Для розрахунку статистичних характеристик використовуються вбудовані функції мови програмування C++.

Для порівняльного аналізу числових характеристик доцільно використовувати коефіцієнт ексцесу (e):

$$e = \frac{E[(x - \mu)^4]}{\sigma^4}. \tag{12}$$

Ексцес є одним з основних параметрів, що визначає відмінність порівнюваного розподілу від нормального. Також розраховувалося СКВ вибірки. Коефіцієнт ексцесу дозволяє оцінити ступінь «важкості» хвостів розподілу. Нормальний розподіл має нульовий ексцес. Якщо хвости розподілу «легші» за нормальний розподіл, то коефіцієнт ексцесу більший від нуля.

У блоці оцінювання спектра реалізовано метод Бартлета [6]. Згладжування за методом Бартлета основане на створенні псевдоансамблю реалізацій за рахунок поділу часового ряду на сегменти, які не перекриваються. Для кожного сегмента за допомогою алгоритму дискретного перетворення Фур'є обчислюється спектральна функція, а потім з метою одержання оцінки спектра потужності проводиться процедура усереднення спектрів за ансамблем сегментів.

Для оцінювання функції автокореляції використовувався прямий метод розрахунків, оснований на визначенні кореляційної функції [7]. Зіставлення спектрів, отриманих методом Бартлета та перетворенням Фур'є від автокореляційної функції, дозволило підтвердити достовірність розрахунків.

Для формування оцінок імовірності появи імпульсної завади використовувалась вибірка розмірністю $n = 10000$ відліків. Відліки, що за амплітудою перевищили рівень 4σ , вважалися відліками імпульсної завади, їх кількість (n_{I3}) підраховувалась та відносилась до загальної кількості відліків, тобто оцінка ймовірності появи імпульсної завади визначалась як $P_{I3} = n_{I3} / n$.

На рис. 4 наведено оцінку спектра процесів на вході та виході фільтрів.

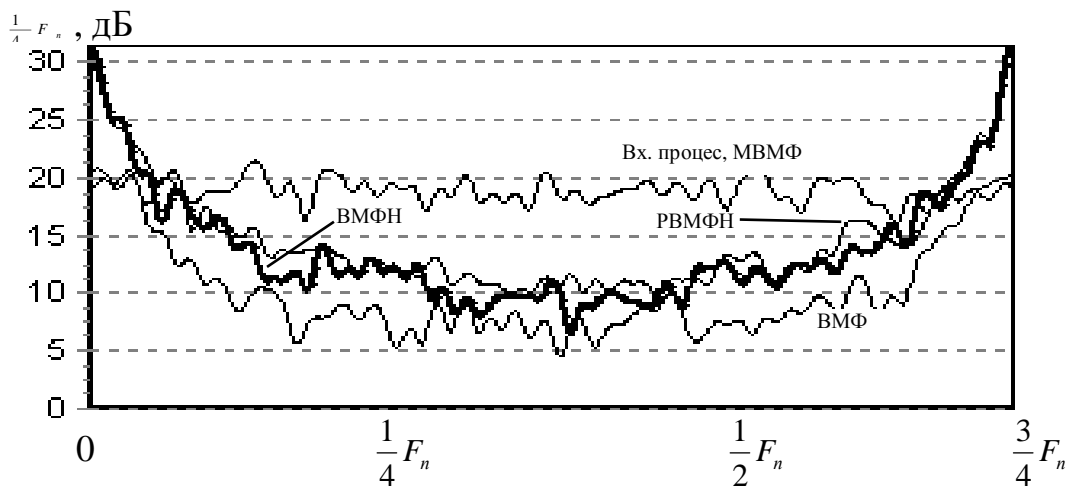


Рис. 4. Оцінка спектра процесів

Зображено спектр вхідного процесу, процесу на виході ВМФ, ВМФН, РВМФН та введеного МВМФ. По осі абсцис відкладено частоту, F_n – частота повторення. По осі ординат відкладено значення спектральної потужності.

Аналіз результатів експерименту свідчить про те, що використання класичних ВМФ призводить до спотворення спектральних характеристик вхідного процесу. Як видно з рис. 4, ВМФ впливають на вхідний процес однаково, подавляючи (на 10–15 дБ) коливання з міжперіодним фазовим зсувом частоти ($\varphi = 2\pi f / F_n$), відмінним від нуля. Процес на виході ВМФН та РВМФН має більшу кількість імпульсів з великою амплітудою та міжперіодним зсувом фази, близьким до нуля.

Це обумовлено тим, що величини амплітуд не враховуються при виборі медіанного значення і в багатьох випадках відлік з аномальним значенням фази буде замінено відліком, який має фазу, близьку до середнього значення, але достатньо велику амплітуду.

Для прикладу, на рис. 5 зображено вхідну реалізацію та результат роботи ВМФН та РВМФН. По осі абсцис відкладено номер відліку в реалізації, а по осі ординат амплітуду.

Графік являє собою комплексну площину, на якій кожний відлік характеризується своєю амплітудою й фазою.

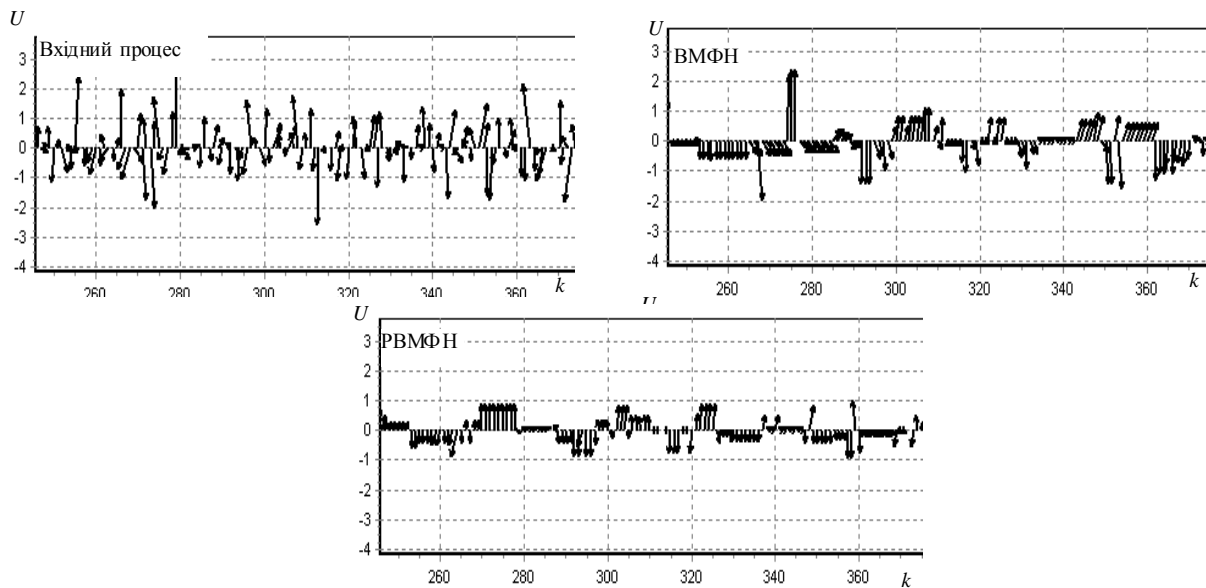


Рис. 5. Векторні відліки вхідної та обробленої реалізації випадкового процесу

Бачимо, що використання ВМФН (8) призводить до зменшення кількості викидів та загального згладжування процесу, але деякі викиди залишаються, тому що їх фаза була найбільш близькою до середнього значення за апертурою, а у деяких випадках такі відліки навіть розмножуються, створюючи "сходинку". Застосування каскадного фільтра РВМФН суттєвого покращення не надає, доля відліків з великою амплітудою зменшується, але процес ще більше "згладжується", утворені на першому етапі "сходинки" залишаються.

СКВ та ексцес процесів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

СКВ та коефіцієнт ексцесу процесів

<i>Процес</i>	<i>СКВ</i>	<i>Коефіцієнт ексцесу</i>
Вх. процес	1	0
Вих. ВМФ	0,46	0,03
Вих. ВМФН	0,66	0,39
Вих. РВМФН	0,64	0,52
Вих. МВМФ	1	0,034

Аналізуючи дані табл. 1, можна помітити, що серед класичних ВМФ найкраще згладжування забезпечує ВМФ (СКВ 0,46, коефіцієнт ексцесу 0,03). Це обумовлено використанням одночасної фільтрації за напрямом та амплітудою, але спотворення спектральних характеристик найбільші. Фільтрація тільки за одним параметром забезпечує гірший результат (ВМФН) – процес згладжується гірше, однак, спотворення спектральних складових дещо менше. Використання каскадного фільтра (РВМФ, див. рис. 1) до деякої міри покращує результат фільтрації, спектральні спотворення менші, але згладжування гірше (див. табл. 1).

Модифікований фільтр МВМФ (8), який має у складі класифікатор стану, кардинально змінює ситуацію: практично не змінюючи спектральних характеристик вхідного процесу, він забезпечує рівень згладжування як у ВМФ.

Зі збільшенням інтенсивності імпульсної перешкоди на вході будь-якого фільтра якість фільтрації знижується, що відповідає відомим теоретичним положенням. ВМФ майже повністю усуває імпульсну перешкоду, а застосування ВМФН суттєвого результату не дає. Замість усунення викидів вони замінюються іншими за фазою, близькою до середньої за апертурою, тобто помилково можуть замінюватися відліки з малою амплітудою, але з фазою, що суттєво відрізняється від інших за апертурою.

Застосування каскадного фільтра РВМФН покращує селекцію імпульсних перешкод, але не суттєво. Фактично фільтр ВМФН виконує однокомпонентну фільтрацію, а РВМФН – каскадну незалежну за кожною складовою, тому результати гірші, ніж при одночасній двокомпонентній фільтрації (фільтр ВМФ).

Медіанний фільтр із класифікатором стану (МВМФ) дає трохи гірший результат селекції імпульсних завад. Це пояснюється впливом похибок класифікації, але якість фільтрації залишається на достатньому рівні. Зазначимо, що вказаний фільтр практично не змінює спектральних характеристик вхідних процесів, що може бути корисним для подальшої обробки сигналів.

Висновки. Розглянуті в роботі ВМФ, ВМФН та РВМФН дозволяють проводити селекцію імпульсних перешкод у вхідному процесі та згладжувати його. На виході фільтрів переважно присутні сигнали, що мають міжперіодний фазовий зсув, близький до нульового. Сигнали, що мають міжперіодний фазовий зсув, близький до π , подавляються на 10–15 дБ.

Використання медіанної фільтрації призводить до суттєвого спотворення спектральних складових процесів, тому процедури когерентної обробки повинні бути завершені на попередніх етапах обробки.

Зазначимо, що ВМФН фактично виконує однокомпонентну фільтрацію, а РВМФН – каскадну незалежну за кожною складовою. Результати селекції імпульсних перешкод обома фільтрами гірші, ніж при одночасній фільтрації за двома компонентами (фільтр ВМФ), що підтверджує відомі положення.

Вважається можливим та корисним використовувати ВМФ, який одночасно виконує дві операції: виділення сигналів з нульовим фазовим зсувом, тобто відбиття від місцевих предметів, та селекцію імпульсних перешкод для фільтрації сигналів, що формують «карту місцевих предметів».

Зазначимо, що всі розглянуті фільтри побудовані за одним принципом – логічної операції порівняння. Це дозволяє значно зменшити вимоги до обчислювальних пристроїв при їх реалізації. Фільтр можна швидко модифікувати до того чи іншого типу шляхом зміни виду метрики, за якою проводиться ранжування.

Запропонований у роботі МВМФ дозволяє проводити селекцію імпульсних завад у вхідному процесі, майже не спотворюючи його спектральних складових, що дозволяє використовувати його перед процедурами когерентної обробки (пристрій СРЦ). Усувається до 80% імпульсних завад, втрати у відношенні сигнал/шум становлять 1–2 дБ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Jaakko Astola. Vector median filters / Jaakko Astola, Petri Haavisto, Yrjo Neuvo // Proceedings of the IEEE. – Vol. 78, No. 4, April 1990.
2. Fast modified vector median filter / B. Smolka, M. Szczepanski, K. N. Plataniotis, F. N. Venetsanopoulos // W. Skarbak (Ed) CAIP 2001, LNCS 2124. 2001. – P. 557–580.

3. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. Преобразования и медианные фильтры ; под ред. Хуанга ; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1984. – 224 с.
4. Lukac R. Performance of basic vector directional filters according to used angle distance. / R. Lukac // Radioengineering. – Vol. 11. – No. 1, April 2002. – P. 31–35.
5. Гризо А. А. Селекція імпульсних завад на підставі модифікованого алгоритму векторної медіанної фільтрації / А. А. Гризо, І. М. Невмержицький, О. Б. Обозовський // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х. : ХУПС, 2011. – Вип. 1(27). – С 72–76.
6. Шахтарин Б. И. Методы спектрального оценивания случайных процессов : учеб. пособ. для ВУЗов / Б. И. Шахтарин, В. А. Ковригин [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.techbook.ru/book.php?id_book=477.
7. Автокорреляционная функция [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%>.
8. Гризо А. А. Узагальнена імовірнісна модель флуктуацій амплітуди відліків нестационарної шумової завади / А. А. Гризо, І. М. Невмержицький, О. Б. Обозовський // Системи озброєння і військова техніка. – 2010. – № 2 (22). – С. 104–108.

Подано 12.10.2015

А. А. Грызо, И. М. Невмержицкий, А. А. Малышев, Б. В. Петролюк
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРОЦЕДУР ВЕКТОРНОЙ МЕДИАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ВОЙСК

В статье представлено описание нескольких вариантов обработки векторных сигналов с помощью процедур векторной медианной фильтрации. Рассмотрены известные варианты алгоритма селекции, которые позволяют значительно уменьшить поток импульсных помех, но приводят к искажению спектральных составляющих входного процесса, и модифицированный алгоритм, основанный на введении классификатора состояния. Для исследования эффективности фильтров проведен имитационный эксперимент, в ходе которого получены оценки статистических показателей процесса на выходе фильтров. Показано, что использование модифицированного векторного медианного фильтра обеспечивает необходимый уровень селекции импульсных помех, не внося существенного искажения спектральных составляющих процесса.

A. A. Gryzo, I. M. Nevmerzhicky, A. A. Malishev, B. V. Petroluk
SIMULATION AND RESEARCH OF THE EFFECTIVENESS OF PROCEDURES
VECTOR MEDIAN FILTERING IN RADIOTECHNICAL TROOPS RADAR

The article describes several treatment options using vector signal vector median filtering procedures. The known algorithm selection options, which can significantly reduce the flow of impulse noise, but leads to a distortion of the spectral components of the input process and a modified algorithm based on the introduction of state of the classifier. To study the effectiveness of the filters performed simulations in which we obtain estimates of statistical indicators of output filters. It is shown that the use of the modified vector median filter provides the necessary breeding impulse noise without introducing significant distortion of the spectral components of the process.