

УДК 621.391.822

doi: 10.32620/aktt.2020.6.10

В. О. ОЛІЙНИК, В. В. ЛУКІН

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна

ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБКИ ТА ОЦІНЮВАННЯ ВЗАЄМНОЇ ЗАТРИМКИ ВИПАДКОВИХ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ НА ТЛІ НЕГАУСОВИХ ЗАВАД

Проаналізовано особливості умов роботи методів і засобів оцінки взаємної затримки і кутового положення джерела випадкового ширококутового сигналу при його прийомі двома просторово-рознесеними датчиками. Особливу увагу приділено моделюванню можливих негаусових завад і аналізу їх впливу на результати оцінки. Передбачається, що цифрова обробка прийнятих сигналів виконується на ділянках певної тривалості (частки секунди). Перша особливість полягає в тому, що, на відміну від багатьох інших застосувань взаємно-кореляційної обробки прийнятих ширококутових сигналів або їх аналогів, інформаційна складова характеризується можливою нестационарністю як в плані потужності і, відповідно, відношення сигнал-шум, так і спектрального складу коливань. Друга особливість полягає в тому, що як внаслідок можливих низьких відношень сигнал-шум на окремих ділянках, так і в результаті впливу негаусових завад, що зазвичай мають розподіл з важкими хвостами, можливі аномальні оцінки взаємної затримки і кутового положення джерела. У таких ситуаціях бажано застосовувати метод оцінки взаємної затримки випадкових ширококутових сигналів, який буде стійким до негаусових завад і виключить аномальні оцінки або хоча б у максимальному ступені знизить ймовірність їх появи. Мета даної роботи полягає в дослідженні можливостей використання інших мір подібності та аналізі ефективності обробки. Показано, що це можливо досягти за рахунок застосування методів на основі стійких відстаней. Проаналізована ефективність різних модифікацій запропонованого методу в залежності від інтенсивності та імпульсивності завад. У відповідності до різних критеріїв оцінена ефективність оброблення і показана необхідність автоматичного отримання відомостей про характеристики завад. Дослідження проведені з використанням тестового ширококутового сигналу. Сформульовано завдання, які необхідно вирішувати в першу чергу для забезпечення високої ефективності обробки. Результати, отримані в процесі моделювання, можуть бути використані у багатьох технічних сферах, де застосовується обробка прийнятого сигналу у несприятливих умовах.

Ключові слова: взаємна затримка, ширококутовий сигнал, негаусові завади, стійке оцінювання, аномальні оцінки, покращення точності.

Вступ

Прийоми та методи, що було винайдено при вирішенні класичних задач в одній галузі, можуть бути використані й у суміжних областях. Наприклад, вирішення задач радіолокації допомагає розв'язати проблеми відстеження сигналу, що приходить на антену, у інших застосуваннях [1]. Так, при ультразвуковій діагностиці внутрішніх органів та неруйнучому контролі зварних з'єднань важливо прийняти та обробити сигнал, що повертається, та дослідити його властивості, що змінилися за час його проходження через середовище розповсюдження [2]. У робототехніці існують аналогічні задачі пеленгації джерела звука [3]. Зазвичай така обробка виконується у цифровому вигляді, що дає можливість застосування різноманітних нелінійних методів та адаптивних алгоритмів для покращення ефективності обробки сигналів [4].

Інформаційні сигнали, що реєструються сенсорами (антенною), зазвичай вважають ширококутовими та шумоподібними. Це стосується мовних сигналів у телеконференціях, коли потрібно відстежувати людину, що говорить, сигналів у гідроакустичних застосуваннях та у неруйнівній діагностиці. Шумоподібні сигнали можуть містити багато гармонійних складових в смузі частот.

Ці сигнали приймаються антенною певної більш чи менш складної конфігурації [3]. Зазвичай вона складається із декількох просторово рознесених сенсорів із заздалегідь відомою геометрією. Це потрібно для більш точного визначення властивостей сигналу та зменшення впливу випадкових факторів як-то неточно відома відстань між приймачами чи її зміна у часі.

Традиційною задачею, яка вирішується за допомогою кількох сенсорів, є визначення кута приходу сигналу. Принцип визначення дуже простий, він базується на інтуїтивно яasnих та фізично зрозумілих

явищах, як-то часова затримка та апріорно відомій швидкості розповсюдження коливань у робочому середовищі [5, 6]. З урахуванням цієї інформації взаємну затримку перераховують у напрямку (кут) надходження. Загальний інтервал спостереження (накопичення) сигналу може бути достатньо великим, якщо, наприклад, ведеться онлайн-трансляція та потрібно відстежувати напрям на людину, що говорить. Тому загальний інтервал розбивають на ділянки відносно невеликої довжини, для яких потім отримують оцінки взаємної затримки в певні моменти часу в результаті обробки.

Такий підхід зумовлений низкою аспектів. По-перше, є можливість мінімізувати негативний вплив можливого руху джерела сигналу. По-друге, вдається спростити обробку і знизити вимоги до пам'яті та об'ємів даних, що оброблюються, а також підвищити швидкість за рахунок застосування швидких алгоритмів (наприклад, швидкого перетворення Фур'є). По-третє, оцінки отримують досить часто, що дозволяє організувати стеження за джерелом сигналу, «відпрацьовувати» його пересування, реалізувати адаптацію до властивостей сигнальної складової, умов прийому суміші сигналу і завад і т. д.

Однак на практиці така організація обробки прийнятих коливань і умови роботи систем (пристроїв) оцінки кута приходу може призводити до ряду небажаних ефектів. Один з них - недостатньо висока точність одержуваних для кожної ділянки (інтервалу) елементарних оцінок затримки або кута приходу. Основні причини – можливе низьке відношення сигнал-шум (ВСШ) і обмежена тривалість інтервалу.

При цьому низьке ВСШ може бути обумовлено різними факторами. У пасивній гідроакустиці - це прагнення зменшити рівень випромінювання, велика дальність до джерела. Для телеконференцій - це реверберація в приміщеннях, наявність у мові людини, що говорить, ділянок мовчання. Додатковим негативним фактором є завади негаусового характеру, які є типовими для різних середовищ поширення коливань і приміщень, де розташовані сенсори [4-6].

Ці фактори можуть призвести не тільки до досить великої дисперсії нормальних оцінок затримки (кутового положення), а й до аномальних оцінок затримки [6-8]. У свою чергу, наявність аномальних оцінок суттєво ускладнює вторинну обробку послідовності оцінок, змушуючи застосовувати робастні (стійкі до викидів) нелінійні методи і алгоритми фільтрації [9, 10].

У такій ситуації одним із завдань є підвищення точності первинних оцінок затримки, в першу чергу зниження ймовірності появи аномальних оцінок. Для випадку прийому широкосмугових сигналів на тлі

негаусових завад [11] нами в останні роки було розроблено кілька підходів. Перш за все, це методи на основі робастного перетворення Фур'є [8]. Недоліком цього підходу є те, що на першому етапі поточні спектри в каналах прийому оцінюються із застосуванням робастного дискретного перетворення Фур'є, яке, на відміну від звичайного перетворення Фур'є (ШПФ), не має швидких алгоритмів, особливо при використанні адаптивних стійких оцінок. Тому швидкість обробки для цього підходу обмежено. Інший підхід – використання методів та алгоритмів, що базуються на попередній фільтрації прийнятої суміші широкосмугового сигналу і негаусових завад із застосуванням нелінійного фільтру або двоетапної обробки (на другому етапі запропоновано застосовувати фільтр на основі дискретного косинусного перетворення (ДКП)) [9]. Такий підхід дозволяє істотно підвищити і швидкість, і ефективність обробки (суттєво знизити ймовірність появи аномальних оцінок затримки). Метод протестовано [9] для звичайного широкосмугового низькочастотного стаціонарного сигналу. Але поки що не зрозуміло, як оптимальним чином встановити параметри фільтрів на обох етапах.

Нещодавно [12] нами було запропоновано метод обробки, що базується на стійкому оцінюванні подібності сигналів у каналах з використанням відстані L1. Але не зрозуміло, чи є така відстань оптимальною для різних характеристик завад. Тож мета даної роботи полягає в дослідженні можливостей використання інших мір подібності та аналізі ефективності обробки.

Модель сигналу

Далі ми розглянемо дуже простий випадок для двох просторово рознесених приймачів, для яких сигнали можуть бути представлені як:

$$x_1(t) = s(t) + \xi_1(t), x_2(t) = s(t - \tau_0) + \xi_2(t), \quad (1)$$

де $s(t)$, $t = [T_b; T_e]$ – широкосмуговий шумоподібний сигнал (наприклад, мова); $\xi_1(t)$ та $\xi_2(t)$ є взаємонеzáлежними реалізаціями адитивного шуму для першого і другого каналів відповідно; τ_0 – затримка часу, яка припускається постійною для інтервалу спостереження, який визначається його початком (T_b) та кінцем (T_e). Інші припущення полягають у тому, що шумоподібний сигнал та адитивний шум мають нульове середнє значення, а (максимальне можливе) значення τ_0 є суттєво меншим, ніж довжина інтервалу спостереження ($T_e - T_b$).

Оптимальним підходом (за умови високого ВСШ та гаусових завад) до визначення оцінки часо-вої затримки є розрахунок крос-кореляційної функції (ККФ) та знаходження координати її глобального максимуму. Для більшості сучасних систем цифрової обробки сигналів ККФ формально визначається як:

$$Y(\tau) = \int_{-T/2}^{T/2} x_1(t)x_2(t + \tau)dt, \quad (2)$$

де $T = T_e - T_b$, $S_{12}(f) = S_1(f)S_2^*(f)$,

$$S_1(f) = \text{FFT}(x_1(t)), \quad S_2^*(f) = \text{IFFT}(x_2(t)), \quad (3)$$

$$Y(\tau) = \text{IFFT}(S_{12}(f)), \quad (4)$$

де $S_1(f)$ – спектральна оцінка суміші сигналу та завади для першого приймача, $S_2^*(f)$ спряжений спектр ШПФ для другого каналу, $Y(\tau)$ оцінка ККФ, IFFT зворотне ПФ. Треба мати на увазі той факт, що фізично розумний діапазон можливих затримок часу визначається відстанню між приймачами L та швидкістю поширення хвилі у середовищі (вода, повітря) C як $\tau_{\max} = L/C$. Якщо $\tau_{\max} \ll T$, тоді $Y(\tau)$ може бути розраховано прямо як дискретна версія (3) для τ від $-\tau_{\max}$ до τ_{\max} та проаналізована лише на цьому інтервалі без практичного зниження ефективності обчислень.

Давайте перепишемо вираз (3) як

$$E_1 + E_2 - 2Y(\tau) = \int_{-T/2}^{T/2} (x_1^2(t) - 2x_1x_2(t + \tau) + x_2^2(t + \tau))dt, \quad (5)$$

де $E_1 = \int_{-T/2}^{T/2} x_1^2(t) dt$ та $E_2 = \int_{-T/2}^{T/2} x_2^2(t + \tau) dt$ – енергії прийнятої суміші що можуть бути прийняті незмінними для стаціонарних широкополосових шумоподібних сигналів та завад.

Тоді лишається знайти глобальний мінімум $\int_{-T/2}^{T/2} x_1(t)x_2(t + \tau)dt$, наприклад, мінімізувати Евклідову відстань (міру подібності) між дискретизованими сигналами $x_1(t)$ та $x_2(t + \tau)$.

Таким чином, маючи $x_1(i), i = 1, \dots, I$ та $x_2(i + j), i = 1, \dots, I$, стає можливим виміряти подібність $S(j), j = -j_{\max}, \dots, j_{\max}$, де $j_{\max}\Delta\tau_{\max} = L/C$, $\Delta\tau$ позначає часову дискретність даних. Евклідова норма, що визначаються як

$$S_E(j) = \sum (x_1(i) - x_2(i + j))^2,$$

де підсумовування проводиться для всіх наявних i , це лише одна з мір відстані (подібності), які потенційно

можна використати для аналізу подібності. Як буде показано у подальшому, існують умови, в яких краще працюють інші міри подібності.

Широкополосовий шумоподібний сигнал був прийнятий для моделювання як більш наближений до реальних умов. Тестовий сигнал генерувався випадковим чином за допомогою генератора Mersenne twister як Гаусовий низькочастотний процес із нульовим середнім значенням. Таким чином широкополосовий сигнал був згенерований як адитивний білий гаусовий шум, що пройшов через фільтр низьких частот. Верхня частота була встановлена рівною 4 кГц, а частота дискретизації дорівнювала 20 кГц. Дисперсія сигналу була фіксованою і дорівнювала одиниці. Для зручності обробки довжину фрагмента було обрано рівною 1024 відліків (0,05 с.). Нижче приведено зразок широкополосового сигналу без завад (рис. 1).

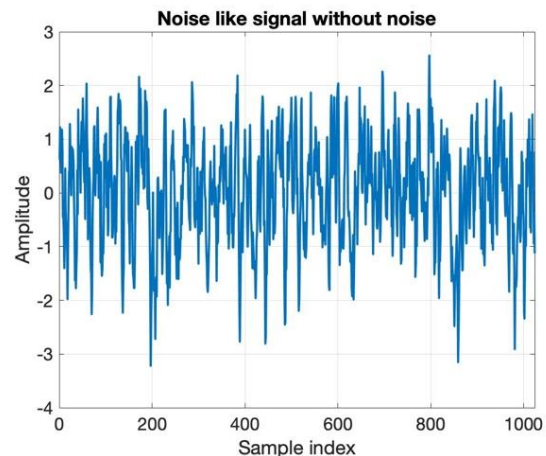


Рис. 1. Тестовий широкополосовий сигнал без завад

Згідно до робіт [4, 11], шумові завади необхідно моделювати як процеси із важкими хвостами. Це впливає із вимірювання характеристик реальних завад в природних середовищах (в атмосферних та підводних умовах, внутрішніх приміщеннях). Якщо шум має вищу імпульсивність, ніж щільність розподілу ймовірності гаусового розподілення, то для нього можна використовувати декілька різних моделей [11]. Для забезпечення можливості гнучкого регулювання імпульсивності шуму у моделюванні щільність розподілення ймовірностей симетричного α -стабільного (SaS) розподілу є гарним вибором [11, 15].

Однак щодо такого вибору є два зауваження. По-перше, для цього немає аналітичного виразу замкнутої форми. По-друге, формально дисперсія може бути нескінченною і це може призводити до проблем із встановленням бажаного відношення сигнал-шум.

Перевага полягає у тому, що розподіл характеризується лише двома параметрами. Першим параметром є α_{SaS} , що характеризує важкість хвоста (α_{SaS} менший для більш важких хвостів, $\alpha_{\text{SaS}} = 2$ відноситься до гаусового розподілу щільності ймовірностей).

Другим параметром є γ , що відповідає за масштаб розподілу щільності ймовірностей (більше γ відповідає більш інтенсивному шуму). Таким чином, змінюючи γ , можна змінювати еквівалентне ВСШ.

Ще однією перевагою сімейства SaS розподілів є те, що існують стандарти для моделювання стабільних випадкових величин (процесів), що підкоряються цьому розподілу.

Запропонований метод

На сьогоднішній день в різних областях, таких, як обробка сигналів та зображень, особливо для негаусових завад [12-14], використовуються численні відстані (міри подібності). Ідея, що розглянута в цій роботі, складається з наступного. Вище та у роботі [12] показано, що звичайна взаємно-кореляційна обробка є еквівалентною розрахунку Евклідової відстані між прийнятими сумішами сигналу та шуму, а затримку можна оцінювати шляхом знаходження такого зсуву сумішей $x_1(t)$ та $x_2(t)$, який забезпечує мінімум такої відстані. Тоді, враховуючи більшу стійкість норми L1 до імпульсів, запропоновано [12] (в дискретному вигляді) розраховувати відстань (міру подібності) як

$$S_{L1}(j) = \sum |x_1(i) - x_2(i + j)|, \quad (6)$$

де підсумовування проводиться для всіх наявних i .

У роботі [12] було проведено моделювання для перевірки такого підходу. Для імітації обробки згідно з (6) для шумоподібного сигналу без шуму було створено набір копій тестового сигналу із зсувом від -100 до +100 відліків вибірки відповідно до вхідного сигналу на рис. 1. Обчислюючи суму абсолютних значень різниць між вихідним сигналом та його зміщеними копіями, можна спостерігати наступний вихідний ефект (рис. 2). Як і можна було очікувати, це функція, що є симетричною відносно значення $j=0$. Для неї для $j=0$ спостерігається очевидний мінімум та основний пелюсток певної ширини. Сума (6) в точці $j=0$ дорівнює нулю. Поза областю головного пелюстка значення міри подібності складають близько 1180. Отже, за відсутністю шуму, алгоритм працює належним чином.

Традиційний підхід до характеристики точності методів і алгоритмів оцінювання затримки передбачає, що оцінки вважаються нормальними, якщо вони

не виходять за межі області основного пелюстка ВКФ відносно істинного значення затримки. Аналогічно для запропонованого підходу та умов моделювання оцінки, які знаходяться в межах значень j від -5 до +5, можна вважати нормальними. Якщо ж ця умова не виконується, то оцінку затримки будемо вважати аномальною. Для нормальних оцінок будемо розраховувати їх дисперсію σ^2 , а для аномальних – ймовірність їх появи P_{abn} . Кращим слід вважати той алгоритм обробки, який мінімізує як дисперсію нормальних оцінок, так і ймовірність аномальних оцінок. Втім, в першу чергу увагу будемо звертати на другий показник, бо під час вторинної обробки послідовно отриманих оцінок затримки більш складно усунути саме аномальні оцінки [1].

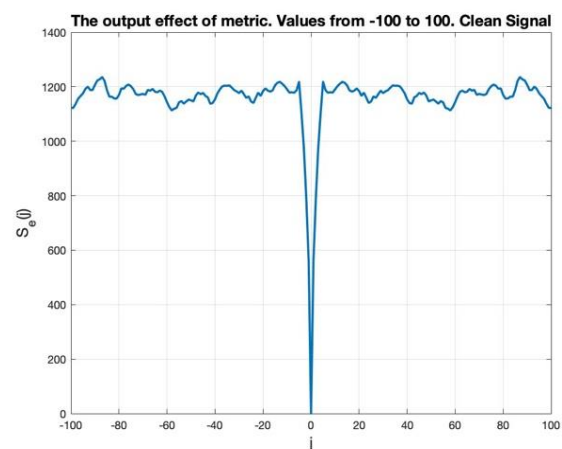


Рис. 2. Вихідний ефект запропонованої функції (6) для сигналу без шуму

Розглянемо два випадки для перевірки працездатності підходу на основі (6) та для його порівняння зі стандартним. Кожен тест моделювався 1000 разів, щоб отримати статистичні дані. У першому випадку тестовий сигнал був спотворений адитивним білим гаусовим шумом малої інтенсивності. У кожній реалізації адитивний шум у другому каналі генерувався випадковим чином. На рисунку 3 показано вид відстані (6) для випадку наявності адитивного гаусового шуму, коли ВСШ становить близько одиниці. Глобальний мінімум все ще знаходиться в тому ж місці нульового зсуву (тобто оцінка затримки є нормальною), але вихідне значення в точці мінімуму становить вже близько 1180. За межами головної пелюстки значення коливаються випадковим чином близько 1650, а сама функція вже не є симетричною відносно координати мінімуму. Зазначимо, що аномальні оцінки затримки для таких умов не спостерігались.

Більш цікава ситуація спостерігалася, коли була використана модель шуму, що представляє процес із симетричним α -стабільним розподілом, що має важкі

хвости. Наш особливий інтерес був у випробуванні нового підходу в умовах, близьких до реальних практичних завдань.

Встановлювати бажане ВСШ і змінювати його для моделювання таких завдань незручно. Цих проблем можна уникнути, змінюючи γ замість ВСШ. Тож наведемо декілька прикладів та результатів з роботи [2]. На наступних рисунках 4-6 наведені приклади для трьох різних комбінацій параметрів α і γ . У першому випадку параметрів $\alpha=1,8$, $\gamma=2$ (рис. 4) вихідний ефект для даної реалізації достатньо спотворений навіть в області основного пелюстка. Однак оцінка затримки все ще є нормальною. Для $\alpha=1,8$, $\gamma=2$ ймовірність нормальних оцінок для запропонованого метода ще практично нульова у той час, коли для стандартного метода вона становить близько 55% (див. дані на рис. 7).

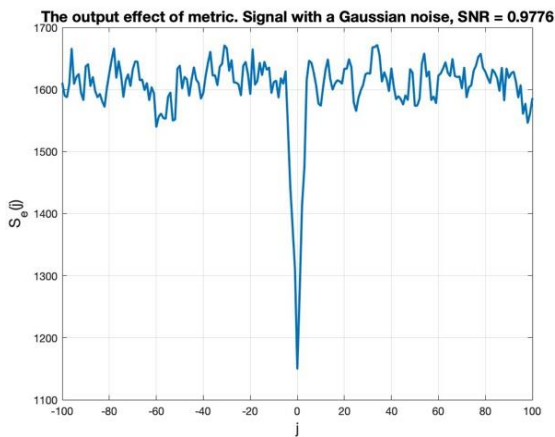


Рис. 3. Вихідний ефект для запропонованої метрики (2). Шумоподібний сигнал пошкоджений гаусовим шумом

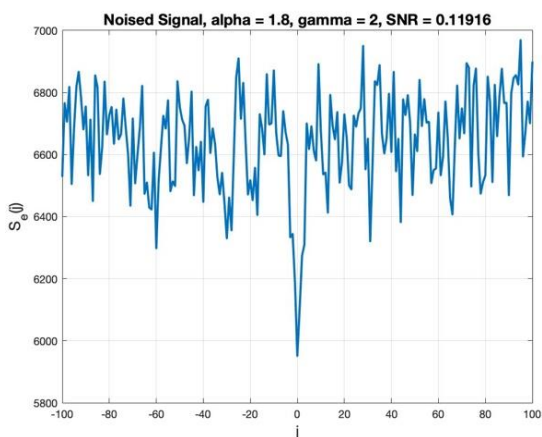


Рис. 4. Вихідний ефект запропонованої міри. Шумоподібний сигнал пошкоджений $S\alpha S$ шумом з низькою інтенсивністю

Інформативний мінімум стає ще менш очевидним, якщо інтенсивність шуму зростає (рис. 5), але оцінка все ще є нормальною.

На рис. 5 показано випадок аномальної оцінки для $\alpha=1,8$, $\gamma=4$. Глобальний мінімум знаходиться в точці +18. Відсоток аномальних оцінок становить близько 32 %, а для стандартного підходу він перевищує 90 %.

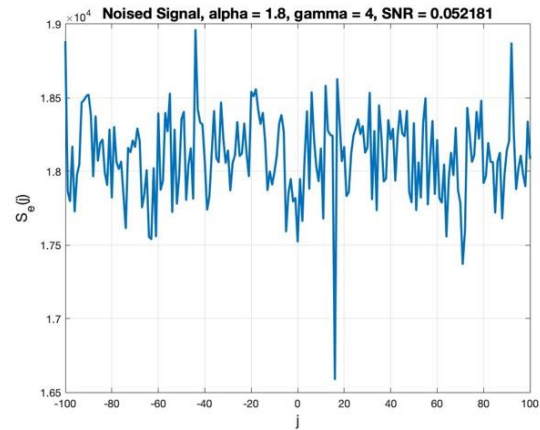


Рис. 5. Вихідний ефект запропонованої міри. Шумоподібний сигнал пошкоджений шумом $S\alpha S$ з високою інтенсивністю

Таким чином, алгоритм на основі (6) навіть при $\alpha=1,8$ (тобто шуму з не дуже важкими хвостами) забезпечує кращу точність оцінювання затримки, ніж стандартний алгоритм. Але виникають наступні питання:

- 1) коли (за яких умов) спостерігаються відмічені переваги алгоритму на основі (6)?
- 2) чи можна використовувати замість (6) інші аналогічні відстані?

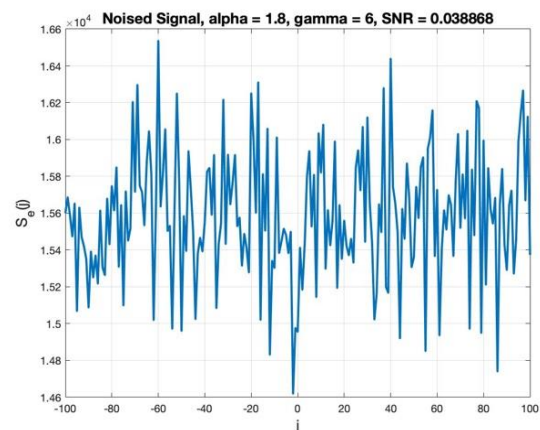


Рис. 6. Вихідний ефект запропонованої метрики. Шумоподібний сигнал пошкоджений $S\alpha S$ шумом з дуже високою інтенсивністю

На рисунку 7 видно, що у порівнянні із стандартним методом новий метод є більш точним для широкого діапазону варіювання параметру γ .

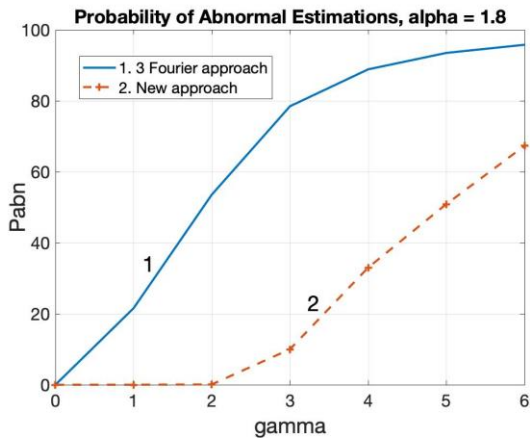


Рис. 7. Порівняння ефективності роботи двох методів

Аналіз ефективності

Тепер проаналізуємо ефективність нового методу в різних можливих практичних ситуаціях та порівняємо його із традиційним методом, що використовує перетворення Фур'є. В наших експериментах значення α_{SaS} дорівнювало 2, 1,8, 1,6, 1,4, та 1,2. $\alpha_{SaS} = 2$ співвідноситься із гаусовим розподіленням та може бути розглянуте як класичний випадок.

Аномальні оцінки стандартного метода з'являються, коли γ починає перевищувати 2. $P_{abn}(\gamma)$ зростає, коли й γ зростає. Для великих значень γ вірогідність аномальних оцінок майже сягає одиниці. Із зменшенням α новий метод та його модифікації дають більш точні результати [12].

Ще одним важливим пунктом є те, що запропонований метод [12] також працює приблизно у 18 разів швидше, ніж звичайний (Приблизно 50 с. для 10000 реалізацій у Matlab порівняно зі звичайним методом (940 с.)). Причина в тому, що використовувані у (6) математичні операції дуже прості.

Можливі модифікації

Якщо знов звернутися до (6), то на думку спадає питання щодо можливості модифікації запропонованого методу, щоб зробити його більш стійким до завад. Звичайна Евклідова відстань розраховується як сума квадратів модулів різниць, також розглядався варіант (6). Але в загальному вигляді можливо записати вихідний ефект як

$$S_{\beta} = \sum |x_1(i) - x_2(i + j)|^{\beta}, \quad (7)$$

де β може бути будь-яким позитивним числом, наприклад 0,5 або 1,5. Є припущення, що для більш ім-

пульсних завад β має бути меншим, тобто в залежності від важкості хвостів розподілу різні модифікації можуть показувати найкращі результати в різних ситуаціях.

Аналіз почнемо з класичного випадку $\alpha=2$. Дані наведені на рис. 8. Найкращі результати мають місце при $\beta=1$ та 1,5, тобто при малих ВСШ запропоновані підходи на основі (6) та (7) з $\beta=1,5$ працюють суттєво краще, ніж стандартний.

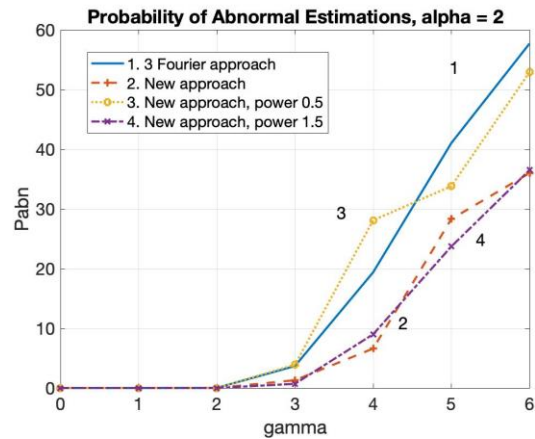


Рис. 8. Порівняння ефективності роботи стандартного метода і модифікацій запропонованого метода для $\alpha = 2$

Ситуація для $\alpha = 1,6$ (рис. 9) є ще більш цікавою. Тут вже найкращі результати забезпечуються при $\beta=1$ та 0,5. А для $\alpha = 1,2$ (рис. 10) найменшу ймовірність аномальних оцінок гарантовано забезпечує вибір $\beta=0,5$. Тож припущення щодо необхідності використання більш стійких мір подібності при збільшенні важкості хвостів розподілу адитивних завад підтверджується. Тоді бажано розробити та використовувати на практиці відповідні адаптивні процедури, основою яких має бути оцінювання важкості хвостів адитивних завад.

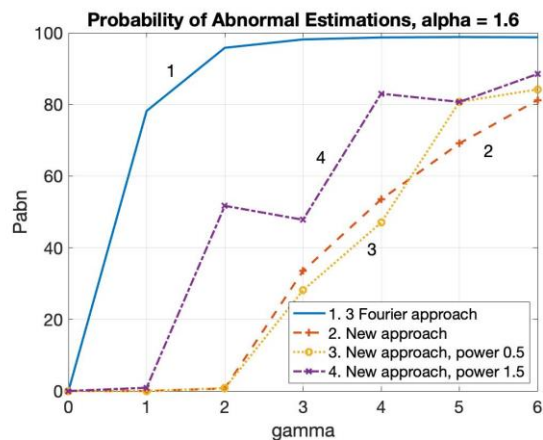


Рис. 9. Порівняння ефективності роботи стандартного метода і модифікацій запропонованого метода для $\alpha = 1,6$

Висновки

Запропоновано і описано новий метод оцінки тимчасової затримки для шумоподібних сигналів в середовищі негаусового шуму. Цей метод заснований на оцінці подібності отриманих сигналів, що є більш стійким до негаусового шуму, що моделюється як симетричний α -стабільний процес. Запропонований підхід дає три переваги. По-перше, він забезпечує меншу ймовірність аномальних оцінок, особливо якщо адитивний шум по суті негаусовий. По-друге, СКВ нормальних оцінок не більше (не гірше), ніж у традиційного методу. По-третє, запропонований метод реалізується швидше, ніж традиційний. У подальшому доцільно розробити дуже швидкий алгоритм оцінювання важкості хвостів розподілу адитивних завад.

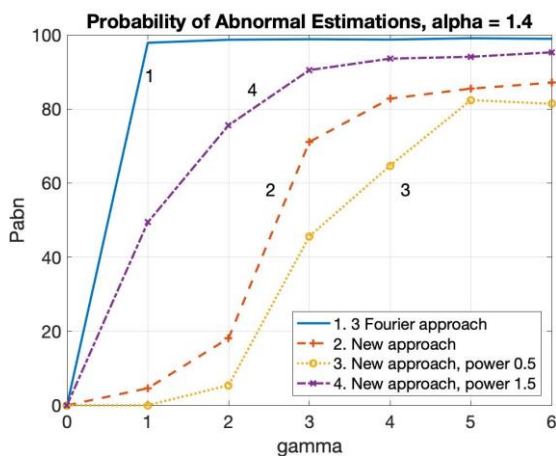


Рис. 10. Порівняння ефективності роботи стандартного метода і модифікацій запропонованого метода для $\alpha = 1,4$

Література

- Osman, L. The application of high-resolution methods for DOA estimation using a linear antenna array [Text] / L. Osman, I. Sfar, A. Gharsallah // *Intern. Journal of Microwave and Wireless Technologies*. – 2015. – Vol. 7, no. 1. – P. 87–94. DOI: 10.1017/S1759078714000464.
- Benesty, J. Study and Design of Differential Microphone Arrays [Text] / J. Benesty, J. Chen. – Berlin : Springer-Verlag, 2013. – 192 p.
- Argentieri, S. Survey on Sound Source Localization in Robotics: from Binaural to Array Processing Methods [Text] / S. Argentieri, P. Danès, P. Souères // *Computer Speech and Language*. – 2015. – Vol. 34, no. 1. – P. 87–112.
- Gustafsson, T. Source Localization in Reverberant Environments: Modeling and Statistical Analysis [Text] / T. Gustafsson, B. D. Rao, M. Trivedi // *IEEE Transaction on Speech and Audio Processing*. –

2003. – Vol. 11, no. 6. – P. 791–803. DOI: 10.1109/TSA.2003.818027.

5. Carter, G. Coherence and Time Delay Estimation: An Applied Tutorial for Research, Development, Test, and Evaluation Engineers [Text] / G. Carter. – Piscataway : IEEE Press, 1993. – 506 p.

6. Ianniello, J. P. Time delay estimation via cross-correlation in the presence of large estimation errors [Text] / J. P. Ianniello // *IEEE Trans. Acoustics, Speech, Signal Processing*. – 1982. – Vol. 30, no. 6. – P. 998–1003. DOI: 10.1109/TASSP.1982.1163992.

7. Georgiou, P. G. Alpha-stable modeling of noise and robust time-delay estimation in the presence of impulsive noise [Text] / P. G. Georgiou, P. Tsakalides, C. Kyriakakis // *IEEE Trans. Multimedia*. – 1999. – Vol. 1, no. 3. – P. 291–301. DOI: 10.1109/6046.784467.

8. Oliinyk, V. Time Delay Estimation for Noise-Like Signals Embedded in Non-Gaussian Noise Using Adaptive Robust DFT [Text] / V. Oliinyk, V. Lukin, I. Djurovic // *Proc. IEEE 7th Mediterranean Conf. on Embedded Computing. MECO-2018 : proc. conf.* – Podgorica, 2018. – P. 267–270. DOI: 10.1109/MECO.2018.8406054.

9. Oliinyk, V., Lukin, V. Time Delay Estimation for Noise-Like Signals Embedded in Non-Gaussian Noise Using Pre-filtering in Channels [Text] / V. Oliinyk, V. Lukin // *IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. TCSET-2020 : proc. conf.* – Lviv, 2020. – P. 638–643. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235510.

10. Fanaswala, M. Detection of Anomalous Trajectory Patterns in Target Tracking via Stochastic Context-Free Grammars and Reciprocal Process Models [Text] / M. Fanaswala, V. Krishnamurthy // *IEEE Journal of Selected Topics In Signal Processing*. – 2013. – Vol. 7, no. 1. – P. 76–90.

11. Nolan, J. P. Stable Distributions: Models for Heavy-Tailed Data [Text] / J. P. Nolan. – Boston : Birkusher, 2005. – 428 p.

12. Oliinyk, V. Fast and Efficient Method for Time Delay Estimation for the Wideband Signals in Non-Gaussian Environment [Text] / V. Oliinyk, V. Lukin, I. A. Djurović // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. ICTM-2020 : proc. conf.* – Kharkiv, 2020. – P. 84–91.

13. Djurović, I. Combination of the adaptive Kuwahara and BM3D filters for filtering mixed Gaussian and impulsive noise [Text] / I. Djurović // *Signal, Image and Video Processing*. – 2017. – № 11. – P. 753–760.

14. Exploiting patch similarity for SAR image processing: the nonlocal paradigm [Text] / C.-A. Deledalle, L. Denis, G. Poggi, F. Tupin, L. Verdoliva // *IEEE Signal Processing Magazine*. – 2014. – Vol. 31, no. 4. – P. 69–78.

References (BSI)

- Osman, L., Sfar, I., Gharsallah, A. The application of high-resolution methods for DOA

estimation using a linear antenna array. *Intern. Journal of Microwave and Wireless Technol.*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 87-94. DOI:10.1017/S1759078714000464.

2. Benesty, J., Chen, J. *Study and Design of Differential Microphone Arrays*. Berlin, "Springer-Verlag" Publ., 2013. 192 p.

3. Argentieri, S., Danès, P., Souères, P. A Survey on Sound Source Localization in Robotics: from Binaural to Array Processing Methods. *Computer Speech and Language*, 2015, vol. 34, no. 1, pp. 87-112.

4. Gustafsson, T., Rao, B. D., Trivedi, M. Source Localization in Reverberant Environments: Modeling and Statistical Analysis. *IEEE Transaction on Speech and Audio Process.*, 2003, vol. 11, no. 6, pp. 791-803. DOI: 10.1109/TSA.2003.818027.

5. Carter, G. *Coherence and Time Delay Estimation: An Applied Tutorial for Research, Development, Test, and Evaluation Engineers*. Piscataway, "IEEE Press" Publ., 1993. 506 p.

6. Ianniello, J. P. Time delay estimation via cross-correlation in the presence of large estimation errors, *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, 1982, vol. ASSP-30, no. 6, pp. 998-1003. DOI: 10.1109/TASSP.1982.1163992.

7. Georgiou, P. G., Tsakalides, P., Kyriakakis, C. Alpha-stable modeling of noise and robust time-delay estimation in the presence of impulsive noise. *IEEE Trans. Multimedia*, 1999, vol. 1, no. 3, pp. 291-301. DOI: 10.1109/6046.784467.

8. Oliinyk, V., Lukin, V., Djurovic, I. Time Delay Estimation for Noise-Like Signals Embedded in Non-Gaussian Gaussian Noise Using Adaptive Robust DFT.

Proc. IEEE 7th Mediterranean Conf. on Embedded Computing, MECO-2018, Podgorica, 2018, pp. 267-270. DOI: 10.1109/MECO.2018.8406054.

9. Oliinyk, V., Lukin, V. Time Delay Estimation for Noise-Like Signals Embedded in Non-Gaussian Noise Using Pre-filtering in Channels. *IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET-2020*, Lviv-Slavske, 2020, pp. 638-643. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235510.

10. Fanaswala, M., Krishnamurthy, V. Detection of Anomalous Trajectory Patterns in Target Tracking via Stochastic Context-Free Grammars and Reciprocal Process Models. *IEEE Journal of Selected Topics In Signal Process.*, 2013, vol. 7, no. 1, pp. 76-90.

11. Nolan, J. P. *Stable Distributions: Models for Heavy-Tailed Data*. Boston, "Birkruher" Publ., 2005. 428 p.

12. Oliinyk, V., Lukin, V., Djurović, I. A Fast and Efficient Method for Time Delay Estimation for the Wideband Signals in Non-Gaussian Environment. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. ICTM-2020: proc. conf.*, Kharkiv, 2020, pp. 84-91.

13. Djurović, I., Combination of the adaptive Kuwahara and BM3D filters for filtering mixed Gaussian and impulsive noise. *Signal, Image and Video Process.*, 2017, no. 11, pp. 753-760.

14. Deledalle, C.-A., Denis, L., Poggi, G., Tupin, F., Verdoliva, L. Exploiting patch similarity for SAR image processing: the nonlocal paradigm. *IEEE Signal Process. Mag.*, 2014, vol. 31, no. 4, pp. 69-78.

Надійшла до редакції 11.10.2020, розглянута на редколегії 16.11.2020

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ И ОЦЕНКИ ВЗАИМНОЙ ЗАДЕРЖКИ СЛУЧАЙНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ НЕГАУССОВЫХ ПОМЕХ

В. В. Олейник, В. В. Лукин

Проанализированы особенности условий работы методов и средств оценки взаимной задержки и углового положения источника случайного широкополосного сигнала при его приеме двумя пространственно-разнесенными датчиками. Особое внимание уделено моделированию возможных негауссовых помех и анализа их влияния на результаты измерений. Предполагается, что цифровая обработка принятых сигналов выполняется на участках определенной продолжительности (доли секунды). Первая особенность заключается в том, что, в отличие от многих других применений взаимно-корреляционной обработки принятых широкополосных сигналов или их аналогов, информационная составляющая характеризуется возможной нестационарностью как в плане мощности и, соответственно, отношения сигнал-шум, так и спектрального состава колебаний. Вторая особенность заключается в том, что как вследствие возможных низких отношений сигнал-шум на отдельных участках, так и в результате негауссовых шумов, которые обычно имеют распределение с тяжелыми хвостами, возможны аномальные оценки взаимной задержки и углового положения источника. В таких ситуациях желательно применить метод оценки взаимной задержки случайных широкополосных сигналов, который будет устойчив к возможным помехам и исключит аномальные оценки или хотя бы в максимальной степени снизит вероятность их появления. Цель данной работы заключается в исследовании возможностей использования других мер сходства и анализе эффективности обработки. Показано, что это возможно добиться за счет применения методов на основе расчета устойчивых расстояний. Показана эффективность различных модификаций предложенного метода в зависимости от интенсивности и импульсивности помех. В соответствии с различными критериями оценена эффективность обработки и показана необходимость авто-

матического получения сведений о характеристиках помех. Исследования проведены с использованием тестового широкополосного сигнала. Сформулированы задачи, которые необходимо решать в первую очередь для обеспечения высокой эффективности обработки. Результаты, полученные в процессе моделирования, могут быть использованы во многих технических сферах, где применяется обработка принятого сигнала в неблагоприятных условиях.

Ключевые слова: взаимная задержка; широкополосный сигнал; негауссовы помехи; устойчивое оценивание; аномальные оценки; улучшение точности.

PECULIARITIES OF PROCESSING AND DELAY ESTIMATION FOR RANDOM WIDEBAND SIGNALS IN NON-GAUSSIAN ENVIRONMENT

V. Oliinyk, V. Lukin

Peculiarities of operation conditions of methods and tools for assessing delay and angular position of the source of a random wideband signal when it is received by two spatially displaced sensors are analyzed. Special attention is paid to modeling of possible non-Gaussian noise and analyzing its effect on estimation results. It is assumed that digital processing of received signals is carried out in intervals of certain duration (parts of a second). The first feature is that, unlike many other applications of cross-correlation processing of received broadband signals or their analogs, the information component is characterized by possible nonstationarity both in terms of power and, accordingly, the signal-to-noise ratio, and spectral composition of oscillations. The second feature is that both due to possible low signal-to-noise ratios in some areas, and as a result of non-Gaussian noise, that usually has a distribution with heavy tails, abnormal estimates of the delay, and angular position of a source are possible. In such situations, it is desirable to apply a method for estimating the delay of random broadband signals, which will be robust to non-Gaussian noise and exclude abnormal estimates or at least to the maximum extent reduce the probability of their occurrence. The purpose of this work is to study the possibilities of using other measures of similarity and analysis of processing efficiency. It is shown that this can be achieved due to the use of methods based on the calculation of robust distances. The efficiency of various modifications of the proposed method is shown depending on the intensity and impulsivity of the noise. Following various criteria, the efficiency of processing is assessed and the need for automatic obtaining of information about the noise characteristics is shown. The studies are carried out using a test wideband signal. The tasks that must be solved first of all to ensure a high efficiency of processing are formulated. The results obtained in the simulation process can be used in many technical fields, where the processing of the received signal in hard noise conditions is kept.

Keywords: mutual delay; wideband signal; non-Gaussian noise; stable estimation; anomalous estimation; accuracy improvement.

Олійник Вячеслав Олексійович – асп. каф. інформаційно-комунікаційних технологій ім. О. О. Зеленського, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Лукін Володимир Васильович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. інформаційно-комунікаційних технологій ім. О. О. Зеленського, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Viacheslav Oliinyk – PhD Student of Department of Information and Communication Technologies named after A. A. Zelensky, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: v.o.oliinyk@khai.edu, ORCID: 0000-0002-0914-8664, Scopus Author ID: 57203140226, https://scholar.google.com.ua/citations?user=GIy_jjkAAAAJ&hl=en

Volodymyr Lukin – Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Department of Information and Communication Technologies named after A. A. Zelensky, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: lukin@ai.kharkov.com, ORCID: 0000-0002-1443-9685, Scopus Author ID: 7102438809, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=XI9iavwAAAAJ&hl=en>