

УДК 681.883

DOI: 10.31673/2412-9070.2020.065154

М. П. ТРЕМБОВЕЦЬКИЙ, доктор техн. наук, ст. наук. співробітник;

П. В. АФАНАСЬЄВ, канд. техн. наук, доцент;

Н. А. ТРИНТИНА, канд. техн. наук, доцент;

Е. В. ІВАНІЧЕНКО, канд. техн. наук;

І. М. НЕФЕДОВА, ст. викладач;

В. А. КОВАЛЬЧУК, студент,

Державний університет телекомунікацій, Київ

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ У ЧАСТОТНОМУ ДІАПАЗОНІ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ ОРТОГОНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

Швидкий розвиток комп'ютерних технологій в останні десятиліття призвело до широкого впровадження методів цифрового оброблення інформації практично в усіх галузях наукових досліджень. Одне з найважливіших місць посідають цифрові сигнали систем оброблення (ЦОС), які використовуються в обробленні даних віддалених завдань навігації аерокосмічних і морських об'єктів, комунікацій, радіофізики, цифрової оптики тощо.

Цифрове оброблення сигналів (ЦОС) динамічно розвивається в галузі, яка охоплює як технічні, так і програмні засоби. Суміжними сферами цифрового оброблення сигналів є теорія інформації, зокрема, теорії оптимального приймання сигналу і теорії розпізнавання. У першому випадку основною проблемою є отримання сигналу на фоні шумів і завад від різної фізичної природи, а в другому — автоматичне розпізнавання, тобто класифікація та ідентифікація сигналу. У цифровому обробленні сигналів відповідно до сигналів ми маємо на увазі його математичний опис, тобто деяку дійсну функцію, яка містить інформацію про стан або поведінку фізичної системи згідно з подією, яка може бути визначена на безперервному або дискретному просторі, зміною в часі або просторовими координатами. У широкому сенсі, системи ЦОС потребують реалізації використання складних алгоритмів. Як правило, системи містять спеціалізовані технічні засоби попереднього (або первинного) оброблення сигналів та спеціальних технічних засобів для вторинного оброблення сигналів. Засоби попереднього оброблення призначені для оброблення вихідних сигналів, які спостерігаються в загальному випадку на тлі випадкового шуму і інтерференції різної фізичної природи і подані у вигляді дискретних цифрових вибірок з метою виявлення і відбору (селекції) корисного сигналу і оцінювання характеристик виявленого сигналу.

Новий метод цифрового оброблення сигналів у частотному діапазоні пропонує використовувати деякі властивості нелінійних ортогональних перетворень. Теоретичні основи цього методу і результати статистичного моделювання довели свою ефективність у придушенні складних завад у каналах зв'язку.

Ключові слова: перетворення; цифрове оброблення сигналів; селекція; лінійна фільтрація; частотний діапазон; гільбертовий простір; ядро Френеля.

ВСТУП

Останні дослідження стосовно цифрових технологій зумовили повернення до існуючого раніше виду перегляду щодо можливості і доцільності різних алгоритмів оброблення складних сигналів, минаючи обмеження традиційних підходів, вочевидь, пов'язаних із властивостями аналогових компонентів. Наприклад, звичайна лінійна фільтрація, якщо вона здійснюється в частотному діапазоні множенням поточного спектра сигналу за допомогою передавальної функції фільтра. Однак при обробленні сигналів у цифровій формі ви можете використовувати багато інших, зокрема нелінійних спектральних перетворень, які не відповідають ніяким реальним аналоговим фільтрам. Типовим прикладом є гомоморфність фільтрації і кепстральний аналіз, в якому реалізується логарифм спектра. Навіть ця проста алгебраїчна операція пропонує велику кількість інформації щодо оброблення сигналу.

Оброблення сигналів із використанням нелінійних ортогональних перетворень

Різні ортогональні перетворення Фур'є-Уолша, Хаара та ін. широко використовуються в обробленні сигналів, що можна подати як $y = Ux$, де U — унітарний оператор (для дискретного оброблення, матриці). Тоді зворотний оператор дорівнює

$$U^{-1} = U^* \quad (1)$$

Якщо x і y є елементами гільбертового простору, то це відображення подається у вигляді відповідного інтегрального перетворення. Унітарно властивість також може бути подана нелінійними операторами, залишаючись як визначення (1). Уперше їх було використано в задачах нелінійної квантової механіки [2], і, на відміну від лінійних унітарних операторів, у загальному випадку вони не мають інтегральні подання, подібні перетворенням Фур'є.

© М. П. Трембовецький, П. В. Афанасьєв, Н. А. Тринтина, Е. В. Іваніченко, І. М. Нефедова, В. А. Ковальчук, 2020

Подання таких операторів описуються нелінійним диференціальним рівнянням типу Шредінгера

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} = H(\psi)\psi \quad (2)$$

із граничними умовами $\psi(\eta_0) = x$, $\psi(\eta_m) = y$, де $\psi(\eta) = \psi(\eta, \lambda)$ — функція з деякого банахового простору, який набуває значення в гільбертовому просторі функцій λ , до якої належать елементи x і y ; $H(\psi)$ — нелінійний безперервний оператор в цьому просторі; η, η_m — відповідно початкові і кінцеві значення змінних. Подання описується рівняннями, які називаються операторами з унітарної нелінійністю.

Використання нелінійних ортогональних перетворень — це реалізація такого подання в задачах цифрового оброблення сигналів для конкретного виду оператора $H(\psi)$

$$H(\psi) = -\alpha \frac{\partial}{\partial \lambda} - f(\psi) \quad (3)$$

вперше було розглянуто в [3; 4]. Нелінійне ортогональне перетворення $y = U(\psi)x$ описується рівнянням (2) з таким оператором $H(\psi)$ і реалізується в результаті лінійних (G_k) і нелінійних (N_k) операторів

$$U(\psi) = \prod_{k=1}^n G_k N_k[\psi_k]. \quad (4)$$

Тип запису $U(\psi)$ означає, що перетворення U залежить не тільки від сигналу x вхідного сигналу, а й на всій траєкторії в гільбертовому просторі, описуваного рівнянням (2) з такими вхідними діями. Кожний із лінійних операторів G_k є інтегральним перетворенням типу згортки з ядром Френеля

$$g_k(\lambda) = g_{0k} \exp\{ia_k \lambda^2\}, \quad (5)$$

де $g_{0k} = \sqrt{4\pi\Delta\eta_0\alpha i}$; $a = \frac{1}{4\pi\Delta\eta_0\alpha}$; $\Delta\eta_k = \eta_{k+1} - \eta_k$ — крок оцифровки за допомогою змінної η ; n — кількість пар ланок.

Нелінійні оператори $N_k[\psi_k]$ відповідають добутку функції $\psi_k(\lambda) = \psi(\eta_{k+1}, \lambda)$ за допомогою коефіцієнтів перетворення, які залежать від нього

$$N_k[\psi_k] = \exp\{if(\psi_k)\}. \quad (6)$$

Після відповідної дискретизації щодо змінної λ ці оператори легко реалізуються в цифровій формі. Перетворення з ядром (5) реалізується з використанням алгоритму швидкого перетворення Фур'є або швидкого перетворення Френеля.

Використання описаного NSS дозволяє розв'язати низку важливих завдань оброблення сигналу: стиснення імпульсів у тимчасовому діапазоні, вибравши для нього тони і імпульсні завади, просторове стиснення елементів зображення [3; 4]. Однак особливий інтерес становить їх використання в частотному діапазоні, який ще не було розглянуто. У цьому разі змінну λ в наведених раніше формулах слід інтерпретувати як частоту, а алгоритм оброблення передувє перехід до частотного діапазону, використовуючи алгоритм FFT. Розглянемо практичне застосування такого перетворення для придушення негауссових зосереджених завад у каналах зв'язку.

Придушення зосереджених завад

Боротьба з шумом зосередженої завади (SP) у каналах зв'язку часто ускладнено тим, що їх спектр майже збігається з шириною спектра сигналу. У цьому разі традиційні методи фільтрації режекції завад неминуче призведе до істотного спотворення сигналу і втрати значної частини своєї енергії. Ефективність фільтрації може бути поліпшена, якщо спектр завади витриманий без істотної зміни корисного сигналу. Такий варіант забезпечується зазначеним LVs: завдяки властивості нелінійності вони вибірково діють на елементи спектра вхідної суміші з різними амплітудами і шириною. При певному виборі параметра α і функції $f(\psi)$ в (3) ефект селективного стиснення концентрованого шуму і збільшення ефективності їх подальшої відмови передбачено. Спотворення, зроблені в цьому випадку в сигналі, за необхідності, усуваються шляхом зворотного перетворення. Це, в силу унітарності, реалізується за формулою, аналогічною (4), зворотній послідовності операторів. Ефективність цього методу щодо приймання дискретних повідомлень було досліджено за допомогою комп'ютерного статистичного моделювання. У цьому випадку функцію було взято з (3) $f(\psi) = k|\psi|^2$, а оптимальні значення параметрів як α і k .

Результати моделювання та висновки

Для того, щоб перевірити ефективність запропонованого способу для роботи з DP, було проведено статистичне моделювання приймання двійкових сигналів у каналі з білим гауссовим шумом (WGN) і випадкового CI, який розподіляється по квадрату амплітуди тривалості закону Накагамі.

Моделювання виконувалося згідно з усіченим нормальним законом, фази — відповідно до єдиного закону. Після придушення залишкового СІ суміш подавалася на вхід кореляційного приймача. Було отримано результати запропонованого способу і два методи лінійної фільтрації — простий режекторний фільтр (ВЯП) з прямокутною АЧХ і оптимальний фільтр Колмогорова-Вінера (PCF).

Залежність імовірності помилки від відношення сигнал/шум для запропонованого фільтра (пунктирна лінія), RF (суцільна лінія), ППР (пунктирна лінія) для різних відсотків перекриття спектрів наведено на рис. 1 і рис. 2.

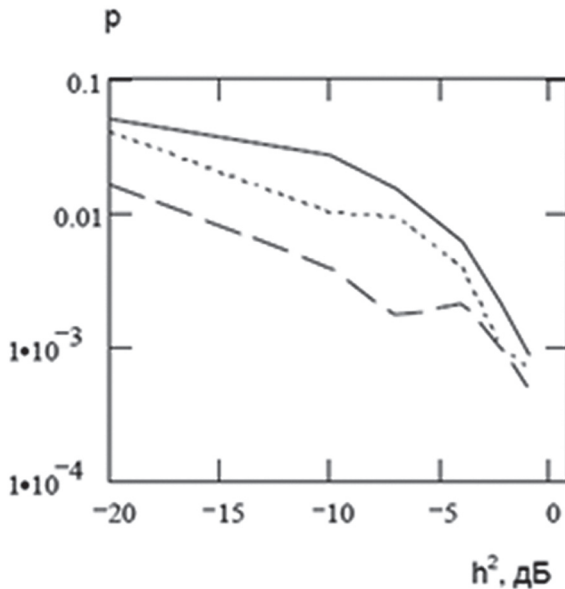


Рис. 1. Залежність імовірності помилки для запропонованого фільтра з перекриттям спектра 40%

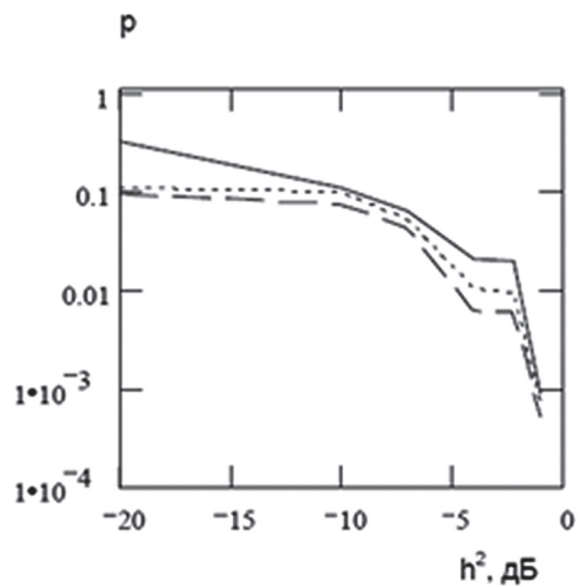


Рис. 2. Залежність імовірності помилки для запропонованого фільтра з перекриттям спектра 60%

Можна бачити, що запропонований спосіб придушення зосередженої завади з прийманням дискретних повідомлень дає значний вигравш порівняно з іншими методами: навіть у порівнянні з PCF на вході демодулятора, на 8 дБ при 40% перекриття і 2 дБ при 60% перекриття. Аналогічна залежність, отримана для різних значень дисперсії амплітуди спектра СІ, показує, що він має незначний вплив на ймовірність помилки. Водночас імовірність помилки здебільшого залежить від дисперсії спектральної ширини. Це вказує на те, що ефективність запропонованого способу може бути поліпшена за рахунок адаптації до змін характеристик сигналу і завад.

Список використаної літератури

1. Rao K. R., Yip P. Дискретне косинусне перетворення. Academic Press, San Diego, 1990.
2. Ахмед Н., Рао К. Р. Ортогональні перетворення для цифрової обробки сигналів. Springer-Verlag, 1975.
3. Wang Z. Швидкі алгоритми дискретного перетворення і дискретного перетворення Фур'є // IEEE Trans, на Acoustics, мови і обробки сигналів. 1984. Т. 32. № 4. Р. 803–816.
4. Коливання коефіцієнта бітових помилок в волоконно-оптичних системах / В. Черняк [и др.] // Журнал световолновой технології. 2004. Т. 22. № 4. С. 1155–1186.
5. Singer A. C., Shanbhag N. R., Bae H.-M. Електронна дисперсія компенсації // IEEE Signal Processing Magazine. 2008. № 11. С. 119–130.
6. Anderson D. Variational approach to nonlinear pulse propagation on optical fibers // Phys. Rev. A: Gen. Phys. 1983, V. 27. No. 6. P. 3135–3145.
7. Роздуми. У нових напрямках в Аналіз часових рядів. Ч. I / D. Бріллінгер, Р. Кейнс, J. Джуек [та ін.] // Springer, Нью-Йорк. 1992. Р. 387–389.
8. BRILLINGER, DR (2002). Життя і професійні внески Джон W. Теки. Statist. 30. P. 1535–1575.
9. Сімончик К. К., Тропченко А. Ю., Хитров М. В. Цифрова обробка сигналів: навч. посібник з дисципліни «Цифрова обробка сигналів». СПб: СПбГУ ІТМО, 2012. 108 с.
10. Турицін С. К., Габитов І. Варіаційний підхід до поширення оптичного імпульсу в дисперсних системах передачі з компенсацією // Оптичний журнал. Соптин. 1998. Vol. 151. P. 117–135.

М. П. Трємбовецкий, П. В. Афанасьев, Н. А. Тринтина, Е. В. Иваниченко, И. Н. Нефедова, В. А. Ковальчук

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Быстрое развитие компьютерных технологий в последние десятилетия привело к широкому внедрению методов цифровой обработки информации практически во всех областях научных исследований. Одной из важнейших мест занимают цифровые сигналы систем обработки (ЦОС), которые используются для обработки данных удаленных задач навигации аэрокосмических и морских объектов, коммуникаций, радиофизики, цифровой оптики и т. д.

Цифровая обработка сигналов (ЦОС) является динамично развивающейся областью, которая охватывает как технические, так и программные средства. Смежной областью цифровой обработки сигналов является теория информации, в частности, теории оптимального приема сигнала и теории распознавания. В первом случае основной проблемой является получение сигнала на фоне шумов и помех различной физической природы, а во втором — автоматическое распознавание, т. е. классификация и идентификация сигнала. В цифровой обработке сигналов в соответствии с сигналом мы имеем в виду его математическое описание, т. е. некоторую действительную функцию, содержащую информацию о состоянии или поведении физической системы в соответствии с событием, которое может быть определено на непрерывном или дискретном пространстве, изменением во времени или пространственными координатами. В широком смысле, системы ЦОС требуют для реализации применения сложных алгоритмов. Как правило, системы содержат специализированные технические средства предыдущих (или первичных) обработок сигналов и специальных технических средств для вторичной обработки сигналов. Средства предварительной обработки предназначены для обработки выходных сигналов, наблюдаемых в общем случае на фоне случайного шума и интерференции различной физической природы и представлены в виде дискретных цифровых выборок, с целью выявления и отбора (селекции) полезного сигнала и оценки характеристик обнаруженного сигнала.

Новый метод цифровой обработки сигналов в частотной области предлагает использовать некоторые свойства нелинейных ортогональных преобразований. Теоретические основы этого метода и результаты статистического моделирования доказали свою эффективность в подавлении помех, концентрированных в каналах связи.

Ключевые слова: преобразования; цифровая обработка сигналов; селекция; линейная фильтрация; частотная область; гильбертово пространство; ядро Френеля.

M. P. Tembovetskiy, P. V. Afanasyev, N. A. Trintina, E. V. Ivanichenko, I. M. Nefedova, V. A. Kovalchuk

USE OF DIGITAL PROCESSING OF THE SIGNALS IN THE FREQUENCY AREA WITH THE USE OF NONLINEAR ORTHOGONAL TRANSFORMATIONS

The rapid development of computer technology in recent decades has led to the widespread adoption of digital information processing techniques in virtually every area of research. In this case, including the various applications of computing, one of the most important places is occupied by digital signals of processing systems (CSP), which are used in the processing of data of remote tasks of navigation of aerospace and marine objects, communications, radiophysics, digital optics and several others. applications.

Digital Signal Processing (DSP) is a dynamic field that covers both hardware and software. Related fields of digital signal processing are information theory, in particular, the theory of optimal signal reception and recognition theory. In the first case, the main problem is the receipt of the signal against the background of noise and interference from different physical nature, and in the second — automatic recognition, classification and identification of the signal. In digital signal processing according to a signal, we refer to its mathematical description, that is, some valid function that contains information about the state or behavior of a physical system according to an event that can be determined on a continuous or discrete space of change over time or spatial coordinates. In a broad sense, CCGS means sophisticated algorithmic, iron, and software. Typically, systems contain specialized pre-processing (or primary) signal processing facilities and special secondary processing facilities. Pre-processing means are intended to process the output signals observed in the general case against the background of random noise and interference of different physical nature and are presented in the form of discrete digital samples for the purpose of detection and selection (selection) of the useful signal and evaluation of the characteristics of the detected signal.

A new method of digital signal processing in the frequency domain is proposed using some properties of nonlinear orthogonal transformations. The theoretical foundations of this method and the results of statistical modeling have proven effective in suppressing interference concentrated in communication channels.

Keywords: conversion; digital signal processing; selection; linear filtering; frequency domain; Hilbert space; Fresnel kernel.