

Полов'як Ігор Михайлович

кандидат військових наук,
старший науковий співробітник,

директор Науково-Методичного Центру кадрової політики МО України.

Мусієнко Андрі Петрович

доктор технічних наук,
доцент кафедри вищої математики,
Державний університет телекомунікацій,
Київ, Україна.

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1849-6716>

SCOPUS ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55901154800>

Клюковський Д.В.

Аспірант
Державний університет телекомунікацій,
Київ, Україна.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1784-996X>

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДА ПРОНІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ВИПАДКОВИХ СИГНАЛІВ РАДІОМОНІТОРИНГУ

Summary. The article describes one of the parametric methods of spectral analysis that is based on the use of any model to describe the signal, that is, when using them, some assumptions are made about the behavior of the signal outside the observed interval. The task of spectral estimation in this case is to find the parameters of the used model, which is selected based on the available a priori information about the process under analysis.

The proposed advanced Proni method, refined by replacing damping sine waves with the use of non-damping sine waves, allows the signal to be distinguished very accurately and to determine its characteristics against very rich interference with the air space. The advantages of the Proni method over other methods of signal transformation (over other methods of spectral analysis) are shown.

The simulations and the obtained graphs of the spectrograms of the impulse signal were received using the Fourier, Chebishev, Bessel methods. According to the obtained graphical data, they fully confirm the advantages of the Proni method for spectral analysis of random pulses.

Анотація. У статті розглянуто один з параметричних методів спектрального аналізу який заснований на використанні будь-якої моделі для опису сигналу, тобто при їх використанні робляться деякі припущення про поведінку сигналу поза інтервалу спостереження. Завдання спектрального оцінювання при цьому зводиться до знаходження параметрів використовуваної моделі, яка вибирається виходячи з наявної апіорної інформації про досліджуваний процес.

Запропонований вдосконалений метод Проні, удосконалений шляхом заміни загасаючих синусоїд на використання незатухаючих синусоїд дозволяє дуже точно виділити сигнал і визначити його характеристики на тлі дуже багатого на перешкоди ефірного простору. Показані переваги методу Проні над іншими методами перетворення сигналів (над іншими методами спектрального аналізу).

Проведено моделювання та отримані графіки спектрограм імпульсного сигналу за допомогою методів Фур'є, Чебішева, Бесселя. Згідно з отриманими графічними даними цілком підтверджують переваги методу Проні, для спектрального аналізу випадкових імпульсів.

Key words: Prony method, model, spectrum, approximation, graphs.

Ключові слова: метод Проні, модель, спектр, апроксимація, графіки.

Вступ: Останнім часом зріс інтерес до параметричних методів спектрального аналізу, особливо в тих випадках, коли класичні методи, засновані на використанні перетворення Фур'є, не забезпечують необхідної точності. Така ситуація виникає або при малих співвідношеннях сигналу та шуму, або при малому інтервалі спостереження досліджуваного процесу. В останньому випадку для підвищення точності визначення спектральної щільності необхідно використовувати апіорну інформацію про поведінку досліджуваного процесу поза інтервалу спостереження.

Параметричні методи спектрального аналізу засновані на використанні будь-якої моделі для опису сигналу, тобто при їх використанні робляться деякі припущення про поведінку сигналу поза

інтервалу спостереження. Завдання спектрального оцінювання при цьому зводиться до знаходження параметрів використовуваної моделі, яка вибирається виходячи з наявної апіорної інформації про досліджуваний процес.

Одним з параметричних методів спектрального аналізу є алгоритм Проні [1], що використовує подання спостережуваного процесу у вигляді комплексного експоненціального ряду. Метод дозволяє за відліком сигналу знайти параметри цих комплексних експонент, що, у свою чергу, дає можливість записати вираз для спектральної щільності досліджуваного сигналу. Широке застосування методу Проні стало можливим тільки останнім часом, оскільки він істотно нелінійний і вимагає великих

обчислювальних витрат. У зв'язку з цим виникла необхідність детального дослідження даного методу з точки зору оптимальності його математичної реалізації, а також потенційної стійкості до флуктуацій відліків сигналу і шумів дискретизації.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми: Найбільш потужним апаратом для всебічного аналізу сигналів в цифровій обробці є спектральний аналіз [1].

Методи спектрального аналізу випадкових сигналів діляться на два великі класи — непараметричні і параметричні. У непараметричних методах використовується тільки інформація, що міститься у даних аналізованого сигналу. Параметричні (parametric) методи передбачають наявність деякої статистичної моделі випадкового сигналу, а процес спектрального аналізу в даному випадку містити визначення параметрів цієї моделі [2].

Значна роль в аналізі сигналів належить комплексному перетворенню Фур'є:

Перетворення Фур'є (ПФ) і його дискретні аналоги (ДПФ) добре відомі та широко застосовуються в техніці спектрального аналізу при стандартній обробці радіосигналів. Воно ефективно в обчислювальному відношенні і просте в реалізації. Як правило, такі процедури дають хороші результати при аналізі частотного складу тривалих за часом радіосигналів. Однак відомі причини, що обмежують застосування перетворення Фур'є при аналізі коротких сигналів, якими можуть бути цифрові радіоімпульси наприклад, використання ДПФ для усічених за часом сигналів призводить нас до ефектів Гіббса, які спотворюють інформацію про спектр сигналу і не дають можливості забезпечити високу точність в спектральній області при аналізі гармонійних компонент [1-3].

Використання віконного перетворення Фур'є покращує оцінювання спектрів [4-6], але не дає повного розв'язання зазначеної проблеми.

Виконані за останні кілька десятиліть всебічні дослідження з питань цифрового спектрального оцінювання привели до істотного розвитку сучасних технологій в цій галузі. Прагнення до знаходження перетворень, які краще відповідають невеликої тривалості сигналів, що володіють довільним тимчасово-просторовим становищем, призвело до появи вейвлет-аналізу [7, 8]. В його основі лежать короткі функції, що володіють тимчасовою (просторовою) і частотною локалізацією, що дає кращу апроксимацію для коротких сигналів і дозволяє точніше визначати їх гармонійні компоненти. Однак використання вейвлет-аналізу при обробці радіосигналів може мати деякі обмеження з точки зору інтерпретації, що пов'язано з формальним вибором деяких ортогональних функцій як базису відповідного перетворення. З вищевикладеного можна зробити висновок що питання перетворення радіо сигналів з подальшим його аналізом остаточно не вирішене і вимагає

постійного вдосконалення. Виходячи з чого застосування удосконалення методів Проні-розкладання, заснованого на застосуванні комплексних експонентів або загасаючих синусоїд, які краще відповідають природі радіо сигналів, для аналізу випадкових радіо сигналів є дуже актуальним.

Виклад основного матеріалу.

Метод Проні – це метод аналізу коротких відрізків сигналу, заснований на апроксимації сигналу кінцевою сумою комплексних експонент.

Сучасний варіант методу Проні узагальнено на моделі, що складаються з загасаючих синусоїд (комплексних експонент), крім цього, в ньому використовується процедура оцінювання параметрів моделі за методом найменших квадратів для наближеної підгонки моделі в тих випадках, коли кількість точок даних $N > 2p$ – перевищує мінімально необхідну їх кількість для визначення параметрів p експонент. Ця процедура отримала назву узагальненого методу Проні.

Метод Проні, строго кажучи, не є методом спектрального оцінювання. Однак (однаке) він тісно пов'язаний з алгоритмами лінійного передбачення за методом найменших квадратів, використовуваними при спектральному оцінюванні на основі моделей авторегресії. На відміну від стохастичних параметричних моделей, метод Проні для апроксимації даних використовується детермінована експоненціальна модель, обчислення спектральної щільності енергії (СЩЕ) та складає суть спектральної інтерпретації методу. Метод Проні доцільно виділяти три етапи:

Перший етап виділення параметрів лінійного передбачення, з допомогою яких здійснюється підгонка наявних даних.

Другий, з коефіцієнтів лінійного передбачення формулюється поліном і визначаються його коріння, які будуть давати оцінки коефіцієнтів загасання і частот синусоїд для кожного експоненціального числа.

Третій етап, шукаємо рішення другої системи лінійних рівнянь, яка дає оцінку амплітуд експонент і початкових фаз синусоїд.

Рівняння відповідні лінійного прогнозу, за своєю структурою ідентичних рівнянь Юла-Уолкера для авторегресійного процесу, а тому існує тісний зв'язок між фільтром лінійного передбачення і авторегресивним процесом. Зважаючи на це співвідношення між параметрами лінійного передбачення та авторегресії, дозволяє інтерпретувати перший і другий етапи як процедуру відшукування полюсів деякого авторегресійного процесу. Таким чином, будь-який метод спектрального аналізу з використанням авторегресійної моделі або моделі авторегресії ковзного середнього, які передбачають визначення положення полюсів, можна (з допуском) розглядати як процедуру Проні.

Розглянемо застосування методу Проні для аналізу радіо сигналів, припустимо. Що мається N

комплексних відліків даних $\mathbf{X} = [x(n)]$. Тоді метод Проні дозволяє оцінити $x(n)$ за допомогою деякої p -членної моделі комплексних експонент:

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^p A_k e^{j2\pi f_k n + j\theta_k} \quad (1)$$

де $1 \leq n \leq N$, T інтервал відліків в с, A_k амплітуда і коефіцієнт загасання (розмірність коефіцієнта загасання c^{-1}) k -ої комплексної експоненти, f_k частота, θ_k початкова фаза k -ої

синусоїди. Значення цих параметрів повністю довільні. У разі відліків дійсних даних комплексні експоненти повинні з'являтися комплексно-сполученими парами рівній амплітуди, що зводить експоненціальне представлення до вираження, виду:

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^{\frac{p}{2}} 2A_k e^{j2\pi f_k n + j\theta_k} \quad (2)$$

де $1 \leq n \leq N$.

Якщо число p - комплексних експонент парне, то матимемо $p/2$ згасаючих косинусоїд. Якщо число p - комплексних експонент непарний, то будемо мати $(p-1)/2$ згасаючих косинусоїд і одну повністю загасаючу експоненту. Вираз (2) можна інтерпретувати як подання тимчасового ряду за допомогою гармонійної синусоїдальної моделі. Різниця між періодограмною моделлю і підходом Проні полягає в тому що в періодограммі частоти вибираються заздалегідь, а в методі Проні частоти

оцінюються на основі наявних (заздалегідь визначених) частот.

Для демонстрації переваги методу Проні над іншими методами спектрального аналізу наведемо натурне моделювання в програмному середовищі Матлаб.

Для цього обчислимо спектр прямокутного імпульсу чотирма різними способами, методом Фур'є, Чебишева, Бесселя та Проні

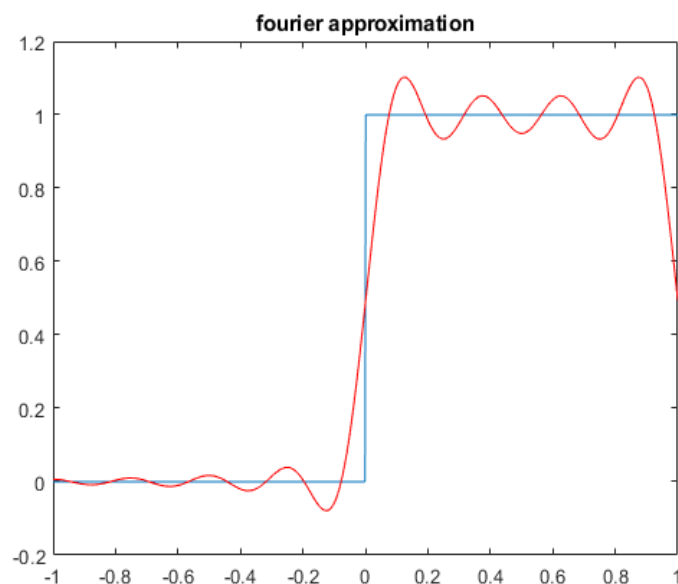


Рис.1. Графік заданого імпульсного сигналу

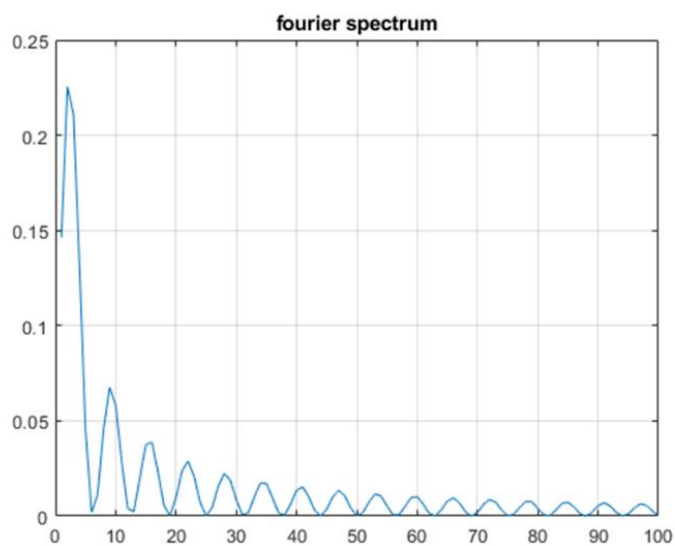


Рис.2. Спектр імпульсного сигналу за методом Фур'є

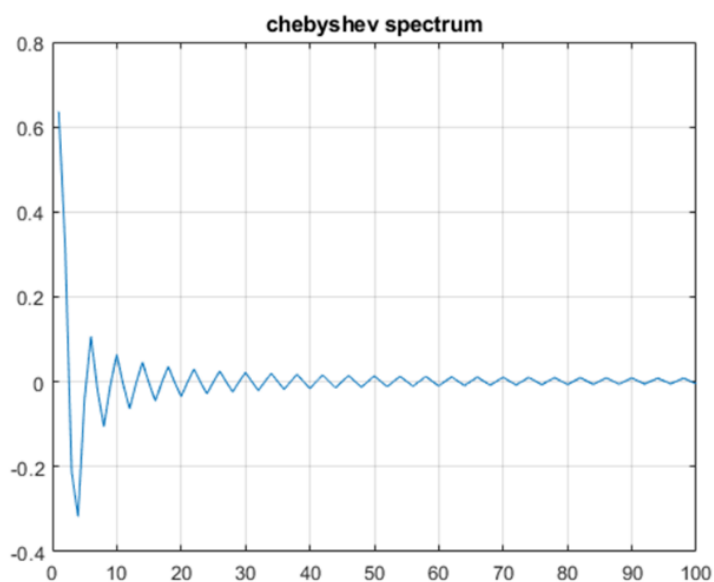


Рис.3. Спектр імпульсного сигналу за методом Чебишева

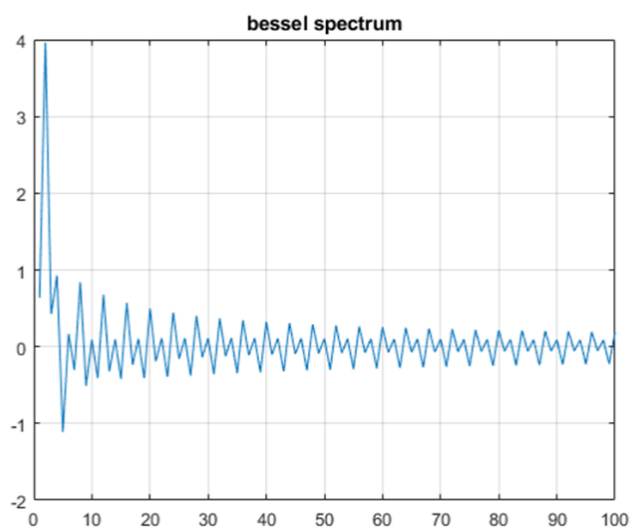


Рис.4. Спектр імпульсного сигналу за методом Бесселя

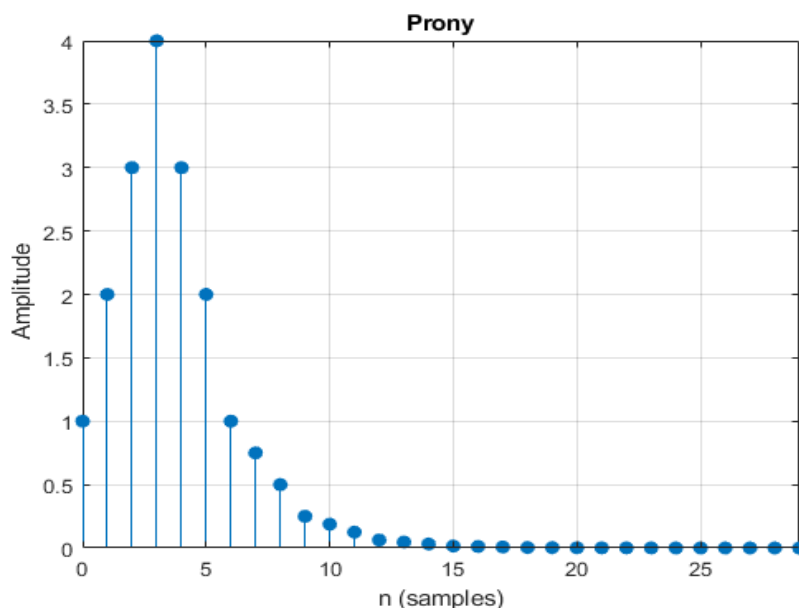


Рис.5. Спектр імпульсного сигналу за методом Проні

Отримані графіки спектрограм імпульсного сигналу за допомогою методів Фур'є, Чебішева, Бесселя, цілком підтверджують переваги метода Проні, для спектрального аналізу випадкових імпульсів.

Вдосконалений метод Проні (незагасаючі синусоїди) дає лінійчатий спектр, оскільки в ньому використовуються допущення про синусоїдальності моделі. Що призводить до отримання дуже точних оцінок чотирьох дійсних синусоїд аналізованого процесу, але до неточного подання шуму, присутнього в цьому процесі. Тобто він дає можливість аналізувати сам сигнал, а не сигнал з шумом, що як раз і потрібно при пошуку засобів негласного отримання інформації

Висновки: Проведено моделювання та отримані графіки спектрограм імпульсного сигналу за допомогою методів Фур'є, Чебішева, Бесселя. Згідно з отриманими графічними даними цілком підтверджують переваги метода Проні, для спектрального аналізу випадкових імпульсів.

Запропонований вдосконалений метод Проні, удосконалений шляхом заміни загасаючих синусоїд на використання незатухаючих синусоїд дозволяє дуже точно виділити сигнал і визначити його характеристики на тлі дуже багатого на перешкоди ефірного простору. Показані переваги методу Проні над іншими методами перетворення сигналів.

Вдосконалений метод Проні дозволяє проводити вимірювання амплітуд і частот сигналу з похибкою 0,5%. Що дозволяє визначати сигнали засобів негласного знімання інформації з дуже високою точністю.

Список літератури:

1. Bucker H.P. Comparison of FFT and Proni Algorithms for Bearing Estimation of Narrow-Band Signal in Realistic Ocean Environment. J. Acoust. Soc. Am., vol 61, pp 756-762, March 1977

2. Chuang C. W., Moffat D.L. Natural Resonances of Radar Targets via Proni's Method and Target Discrimination. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-12, pp 583-589, 1976

3. Hildebrand F.B. Introduction to Numerical Analysis. McGraw-Hill Book Company, New York, 1956, ch 9.

4. Марпл С.Л.-мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения, перевод с англ. О.И. Хабарова и канд. физ.-мат наук Г.А. Сидоровой, М-Мир-1990. 584 с.

5. Мусієнко А. П., Лаптев О. А., Собчук В. В., Борсук Б. М. Методика вибору оптимального вхідного сигналу радіомоніторингу для програмних засобів на базі перетворення Фур'є // Системи управління, навігації та зв'язку, 4(56), 2019 ISSN 2073-7394, С. 135-141

6. Лаптев О.А. Порівняльний аналіз методів розпізнавання сигналів радіозакладних пристроїв на основі частотних перетворень // Телекомунікаційні та інформаційні технології, (3), 2019, ISSN 2412-4338, С. 35-45.

7. Лаптев О.А., Половінкін І.М., Клюковський Д.В., Барабаш А.О., Модель пошуку засобів негласного отримання інформації на основі диференціальних перетворень

// Sciences of Europe. Praha, Czech Republic (ISSN 3162-2364). 2019. Vol. 1. No 43.

8. Курузов В.М. Загоризонтные РЛС декаметрового диапазона: области применения и принципы построения / В.М. Курузов // Судостроение за рубежом. - 1989-№ 11.-С. 21-31.

9. Никитин А.В. Цифровой параметрический спектральный анализ широкополосных сигналов по методу Прони. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<http://fizmathim.com/tsifrovoy-parametricheskiy-spektralnyy-analiz-shirokopolosnyh-signalov-po-metodu-proni> (22.09.2019)