

ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗРІЗНЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ВУЗЬКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ НОВИХ ПІДХОДІВ ЧАСТОТНО-ЧАСОВОЇ ВАГОВОЇ ОБРОБКИ

В даній статті розглядається питання застосування частотно-часової вагової обробки вузькосмугових фінитних нестационарних сигналів при реалізації алгоритмів їх узгодженої обробки. Досліджено можливість і запропоновано шлях реалізації узгодженої фільтрації сигналів, фазовий спектр яких є випадковим, що дає змогу досягти практично потенційних можливостей розрізнення.

Ключові слова: нелінійна частотна модуляція; спектр; стаціонарна фаза; радіус впливу; вейвлет, корелятор.

O. M. SHYNKARUK, I. I. CHESANOVSKYY

National academy of the State border service of Ukraine named after Bohdan Khmelnytsky, Ukraine

D. O. LEVCHUNETS

Khmelnytsky National University, Ukraine

OPTIMIZATION OF BOTH IDENTIFYING ALGORITHMS AND DISTINGUISHING NON-STATIONARY NARROWBAND SIGNALS, THAT BASED ON MODERN TIME-FREQUENCY WEIGHTING APPROACHES

The use of time-frequency processing narrowband finite non-stationary signals in the implementation of coherent processing algorithms is shown in this report. The way to matched filtering implementation for signals with random phase response is proposed. It allows to reach for almost potential signals distinguishing

Keywords: nonlinear frequency modulation; spectrum; stationary phase; radius of influence; wavelet, correlator.

Перехід радіосистем на широкосмугові технології передачі дискретних повідомлень обумовили значний прогрес в питаннях підвищення енергетичної і частотної ефективності використання радіоресурсу. Проте, високі показники ефективності таких систем досягаються лише в умовах високої «завантаженості» радіоканалу, що притаманно тільки окремому класу телекомунікаційних і радіолокаційних систем, в інших випадках доцільність розширення смуги частот радіоканалу, є як правило, невиправданою і більш оптимальним варіантом є «вузькосмугові» варіанти побудови радіоканалу. Іншим випадком, при якому канал не може бути реалізований із застосуванням широкосмугових сигналів, є системи добування інформації, в яких корисна інформація представляє собою вузькосмуговий модулюючий процес зондуемого сигналу. В багатьох випадках, цей процес є детермінованим в обмеженій множині реалізацій і задача зводиться лише до правильного розрізнення наявної реалізації. Це типовий випадок локації (радіо, акусто, сейсмо), коли основна проблема на етапі обробки сигналів полягає в необхідності розрізнення сигналів, що слабо рознесені як в часі так і по частоті. Особливість цього випадку полягає в тому, що достеменно відомо про різну частотно-часову динаміку сигналів, яка обумовлена різними просторовими формами об'єктів зондування. Проте, в наслідок вузькосмуговості зондуемых сигналів і самих модулюючих фізичних ефектів, реалізувати цю особливість у вигляді узгодженого алгоритму практично неможливо. Розглянемо випадок, коли необхідно розрізнити дві реалізації обмеженого в часі сигналу, що модульований по частоті вузькосмуговим полігармонійним процесом

$$u(t) = U(t) \cos(\omega_0 t + \psi(t)), \quad (1)$$

де

$$U(t) = \begin{cases} \text{const}, & 0 \leq t \leq \tau_i \\ 0, & t < 0, t > \tau_i \end{cases}, \quad \psi(t) = \Delta\omega \int_0^t \sum_i u_i \sin(\Omega_i x + \varphi_i) dx,$$

τ_i - тривалість сигналу (імпульсу); $\Delta\omega$ - девіація частоти.

Форми двох реалізацій сигналу (1) з різними комбінаціями початкових фаз φ_i в полігармонійному модулюючому коливанні приведені на рис. 1.

Така форма модулюючого коливання в задачах локації виникає в наслідок нелінійності фазочастотної характеристики ефективної розсіюючої поверхні об'єкта локації, що притаманно навіть елементарним формам поверхонь, особливо в резонансному діапазоні. При здійсненні частотної модуляції гармонійного коливання сигналами такої форми з невеликим значенням коефіцієнта модуляції, спектри сигналів, як це видно з рис. 2, практично не розрізняються, а отже вирішити задачу розрізнення таких сигналів достатньо важко.

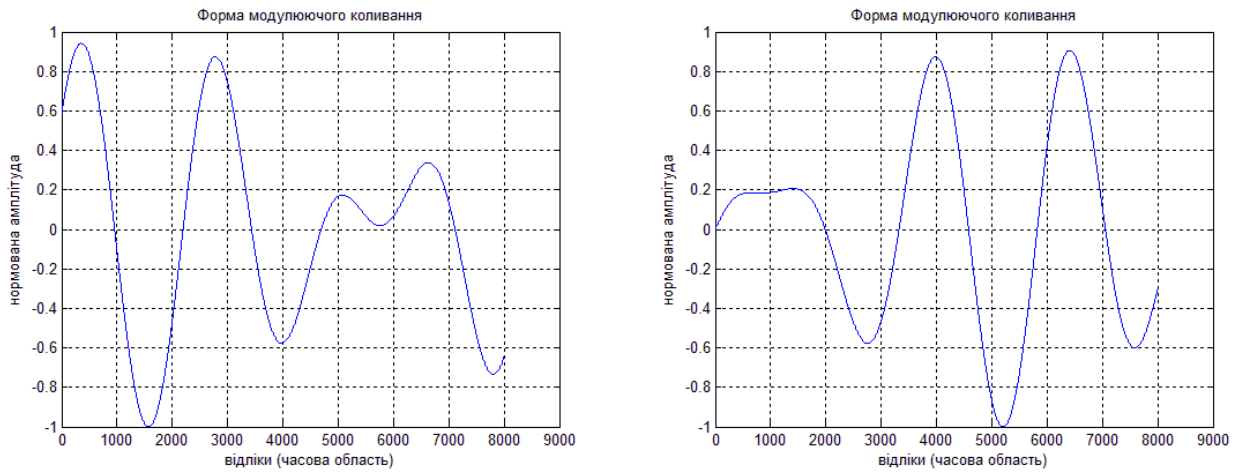


Рис. 1. Випадкові форми двох модулюючих полігармонійних коливань

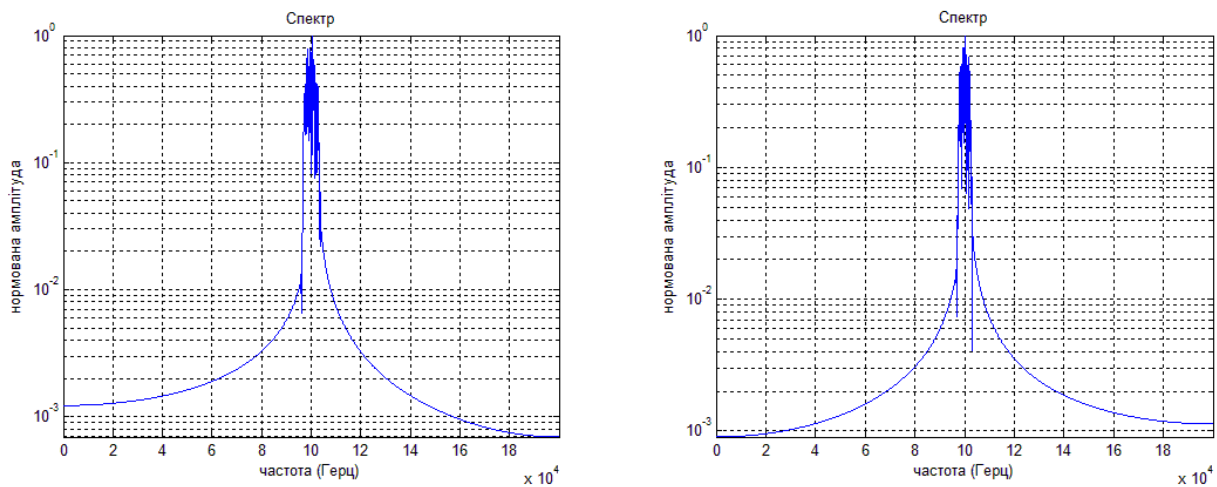


Рисунок 2 – Амплітудні спектри сигналів модульованих по частоті різними вузькосмуговими полігармонійними коливаннями

Проте, якщо виходити з інтуїтивних уявлень про частотну модуляцію і розглянути частотно-часову структуру спектрів сигналів (спектрограму), що показані на рис. 3, можна побачити, що навіть при грубій оцінці частотної динаміки вона достатньо чітко проглядається.

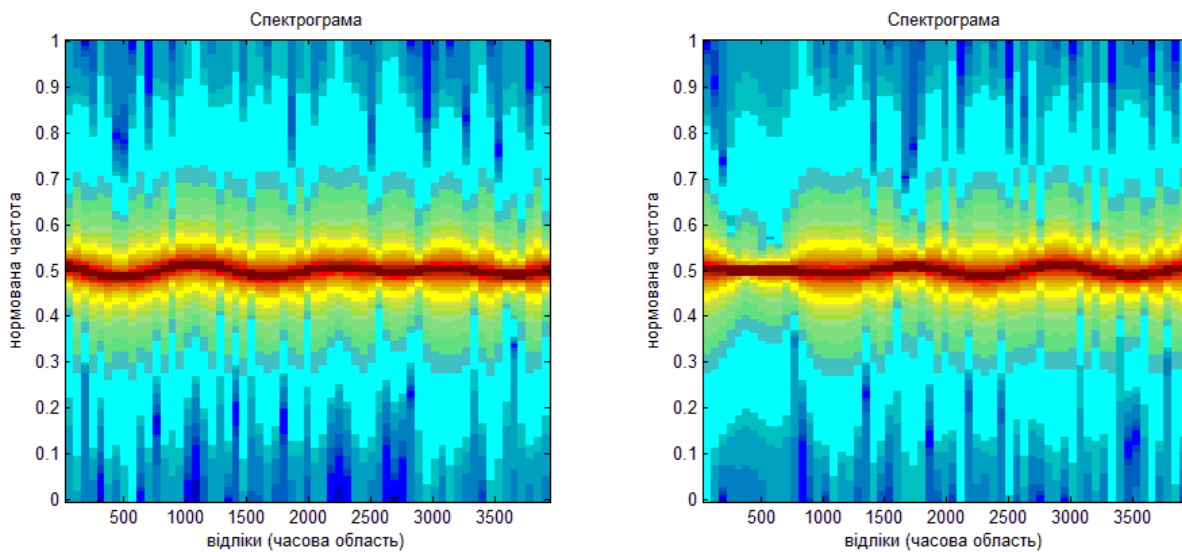


Рис. 3. Спектрограми двох реалізацій сигналів з полігармонійною частотною модуляцією при різних формах модулюючих коливань

З рис. 3, також видно, що в миттєвому (в сенсі вузького проміжку часу аналізу) спектрі сигналу присутня значна динаміка його локалізації, в залежності від форми модулюючого сигналу. Це створює передумови до застосування віконного або локальнобазисного підходів для більш ефективної обробки таких

сигналів за умови, що вікно в двовимірному просторі забезпечить оптимальну локалізацію і буде володіти динамічним «центром ваги».

В загальному випадку, частотно-часове представлення сигналу може бути виражене у вигляді

$$S(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} W(t - \tau)u(\tau)e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (2)$$

де $W(x)$ - віконна функція, що забезпечує локалізацію сигналу в часовому вимірі.

Як показує практика застосування віконних спектральних перетворень, в задачах аналізу нестационарних вузькосмугових сигналів, при наявності навіть незначної частотної динаміки в сигналі, їх ефективність значно знижується, оскільки будь-яка деформація вагового вікна для відслідковування частотного тренду сигналу, призводить до спотворення частотного спектру самого вікна. При цьому, чим вища динаміка вікна, тим більші спотворення в його частотному спектрі і тим нижча ефективність обробки сигналу в цілому. З іншої сторони, застосування локальнобазисного перетворення, що фактично полягає в заміні ядра інтегрування $W(t - \tau)e^{-j\omega\tau}$ певною фінітною функцією, яка при цьому характеризується ще й значною частотною локалізацією. Прикладом цього може бути вейвлет перетворення, яке цю задачу, як показує аналіз, також не вирішує, оскільки локалізація енергії сигналу відносно коефіцієнтів розкладання також є поганою, що видно з рис. 4.

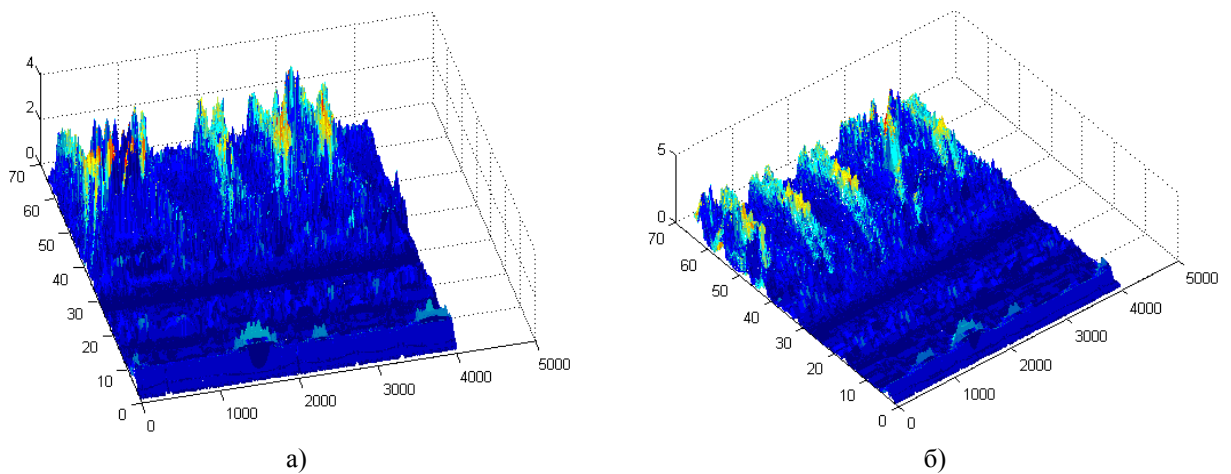


Рис. 4. Вейвлет перетворення сигналів з використанням вейвлету Шеннона (Shan) в першому (а) і другому випадках (б)

Проте, аналізуючи різні представлення цих двох сигналів, стає очевидною одна особливість, а саме, наявність зон де енергія сигналу концентрується значно вище ніж в інших місцях. Використовуючи цю особливість можна досягти значного виграшу від використання віконного (локальнобазисного) перетворення застосовуючи стаціонарні віконні функції в часові інтервали, де спектр сигналу максимально концентрується.

Структура пристрою, що реалізує даний підхід приведена на рис. 5.

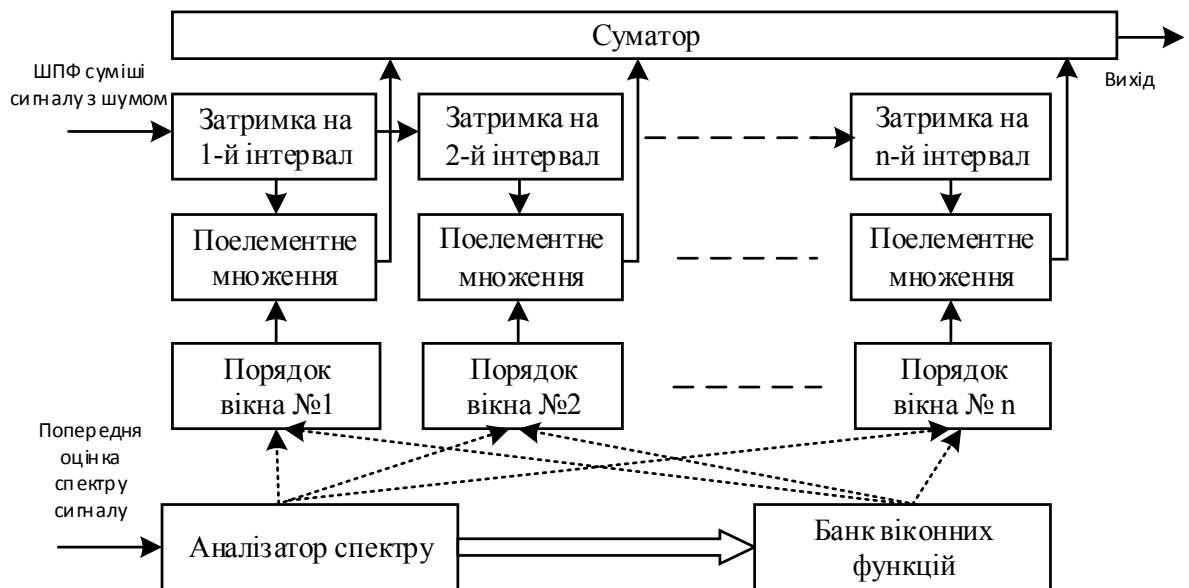


Рис. 5. Структурна схема пристрою частотно-часової обробки нестационарних сигналів

Ключовим моментом застосування даного підходу, є визначення необхідних часових затримок при позиціонуванні вагових вікон та визначення їх порядку. Для вирішення цієї задачі можна скористатись відомим підходом, що базується на асимптотичних методах наближеної спектральної оцінки сигналів – методом стаціонарної фази. Даний метод базується на застосуванні наближеної формули

$$G = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-p\varphi(x)} dx \approx \sqrt{\frac{2\pi}{p\varphi''(x_0)}} f(x_0)e^{-p\varphi(x_0)}, \quad (3)$$

яка дає змогу визначати спектральну щільність сигналу в «особливих» точках – так званих точках стаціонарної фази, в яких концентрація спектральної щільності найвища. Особливість даних точок полягає в тому, що в них відсутня динаміка повної фази сигналу, тобто

$$\frac{d}{dt}(\omega_0 t + \psi(t)) = 0. \quad (4)$$

А це означає, що саме в цих точках є сенс проводити вагову обробку спектру сигналу для потенційного підвищення ефективності алгоритму виявлення та розрізнення.

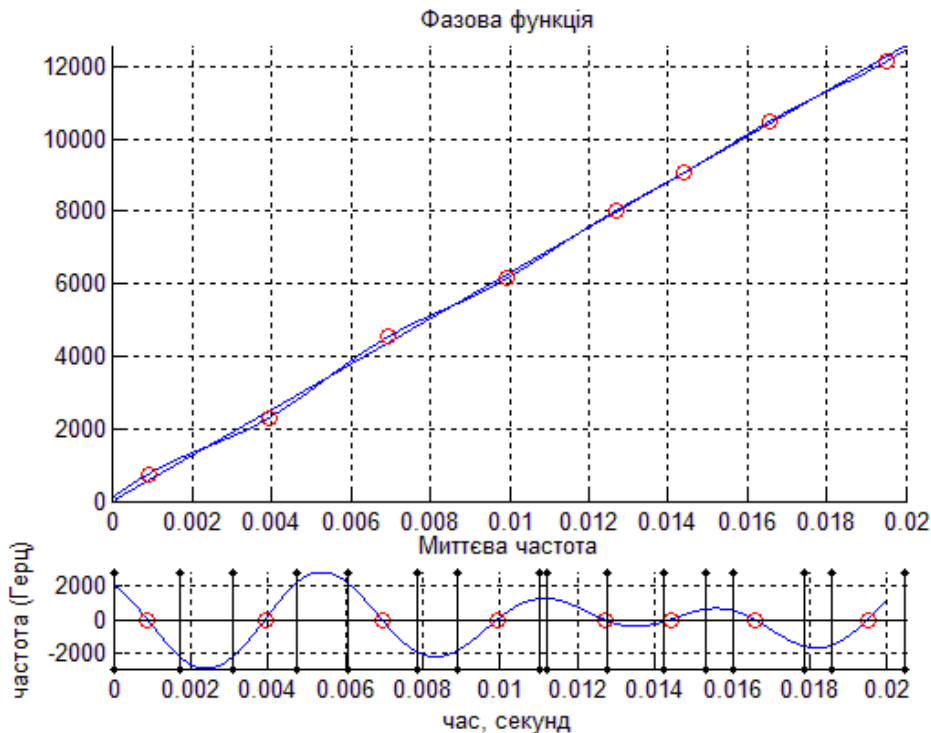


Рис. 6. Оцінка точок стаціонарної фази

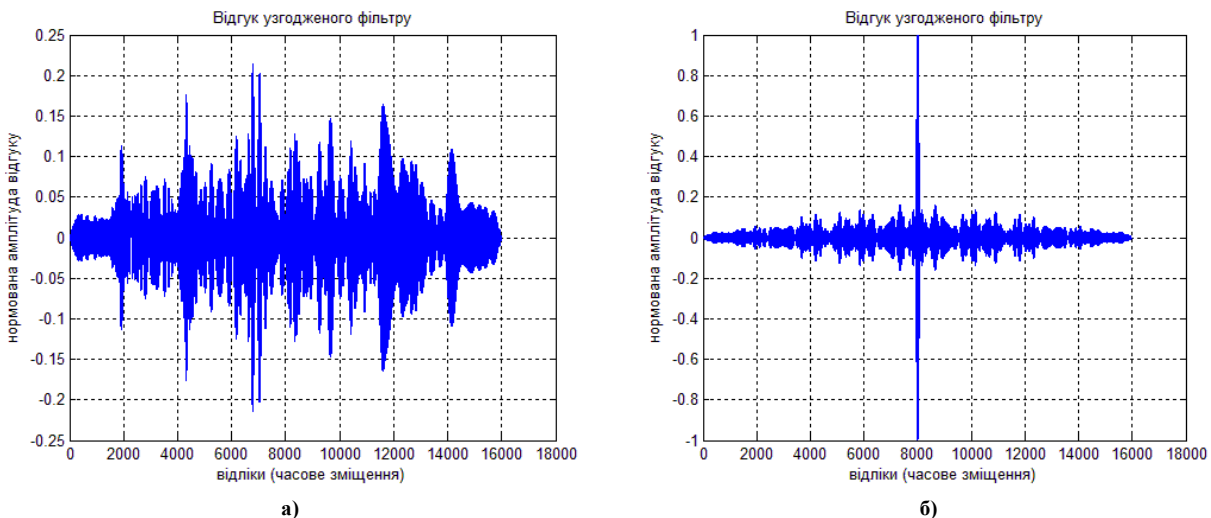


Рис. 7. Нормовані відгуки узгоджених фільтрів без застосування (а) і після застосування вагової обробки (б)

Часова локалізація вагових вікон (порядок вікна) визначається з радіусу впливу [1, 2] стаціонарної точки, що в фізичному розумінні є другою похідною від фазової функції. На рис. 6 приведено результати оцінки точок стаціонарної фази одного з сигналів. Як видно з рисунків, частотно-часова структура сигналів,

незважаючи на те що вони повністю перекриваються по частотній смузі, часовий розподіл спектральної концентрації у них сильно відрізняється. На рис. 7 приведено результати узгодженої фільтрації вузькосмугового сигналу із застосуванням і без застосування вагової обробки.

Як видно з отриманих рисунків, ефективність використання енергії сигналу (виходячи із оцінки основної пелюстки відгуку узгодженого фільтру) збільшується в декілька разів, що свідчить про дієвість запропонованого підходу.

Отримані результати дослідження показують ефективність застосування віконного (локальнобазисного) перетворення при побудові оптимальних алгоритмів обробки (виявлення та розрізнення) вузькосмугових сигналів. Як видно із результатів моделювання, застосування вагової обробки спектру сигналу лише в околицях стаціонарних точок дає змогу підвищити ефективність алгоритмів виявлення та розрізнення сигналів за рахунок їх обробки лише в інтервалах найбільшої частотної концентрації.

Література

1. “Вопросы перспективной радиолокации”, Collective monograph. Edited by A. Соколов. – М.: Радиотехника, 2003 р., с. 512.
2. В. Кравченко, В. Рвачев, “Алгебра логики, атомарные функции и вейвлеты в физических приложениях”, М.: ФИЗМАЛИТ, 2006 р., с. 416.
3. В. Попов, “Исследование влияния боковых лепестков спектра окон на погрешности обработки и передачи сигнала”, М.: МГТУ, 2010 р., с. 203.
4. Л. Варакин, “Теория сложных сигналов” Советское радио. Москва, 1970 р., с. 376.
5. Ч. Кук, М. Бернфельд, “Radar signals” Советское радио. Москва, 1971 р., с. 567.
6. Кочемасов В. Н., Оконеchnikov В. С. Сжатие частотно-модулированных сигналов с небольшим произведением девиации частоты на длительность импульса // Зарубежная радиоэлектроника. 1987 р., № 1. с. 82-94.

References

1. “Voprosy perspektivnoi radyolokatsyy”, Collective monograph. Edited by A. Sokolov. – М.: Radyotekhnika, 2003 y., pp. 512.
2. V. Kravchenko, V. Rvachev, “Algebra lohyky, atomarnye funktsyy y veivlety v fyzycheskykh prylozhenykh”, М.: FYZMALYT, 2006 y., pp. 416.
3. V. Popov, “Yssledovanye vlyianyia bokovykh lepestkov spektra okon na pohreshnosty obrabotky y peredachy syhnala”, М.: MHTU, 2010 y., p. 203.
4. L. Varakyn, “Teoryia slozhnykh syhnalov” Sovetskoe radyo. Moskva, 1970 y., pp. 376.
5. Ch. Kuk, M. Bernfeld, “Radar signals” Sovetskoe radyo. Moskva, 1971 y., pp. 567.
6. Kochemasov V. N., Okonechnykov V. S. Szhatye chastotno-modulyrovannykh syhnalov s nebolshym proyzvedenyem devyatsyy chastoty na dlytelnost ympulsa // Zarubezhnaia radyoelktronyka. 1987 y., # 1. pp. 82-94.

Рецензія/Peer review : 5.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 15.12.2015 р.