

УДК 681.518.2

О.В. Шульга

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

## ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ НЕКОНТРОЛЬОВАНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ РАДІОТЕХНІЧНИХ СТАНЦІЙ

Визначено, що щільність розподілу потужності процесу нестабільності надзвичайно складно оцінити безпосередніми вимірами, тому що її складові малі в порівнянні з потужністю складовою основної частоти. Більш доступними є вимірювання часових характеристик нестабільності частоти. Описаний метод ідентифікації космічних апаратів (КА) за неконтрольованими випромінюваннями (НКВ), який полягає в аналізі випромінювання бортової апаратури виявленого космічного об'єкту (КО) і зіставленні з математичними моделями процесів які ідентифікуються, що дозволить підвищити якість функціонування системи контролю космічного простору, а також забезпечить додаткові відомості про роботу бортових апаратів (БА) КА, і відрізняється тим, що дозволяє класифікувати КО по особливостям роботи внутрішніх систем функціонуючих КА в пасивному режимі локації.

**Ключові слова:** космічний апарат, ідентифікація, система контролю космічного простору, локація, щільність потужності, коливання гетеродина, динамічна модель, кусково-лінійна апроксимація.

### Вступ

При побудові алгоритмів обробки сигналів некерowanego випромінювання (НКВ), як правило, стикаються з низкою факторів, найбільш істотним з яких є врахування виду заважаючих впливів радіотехнічних станцій (РТС) [1]. При цьому широко відомі алгоритми розроблені для гаусових перешкод, однак на практиці має справу з перешкодами, відмінними від гаусових [2]. Інша особливість, з якою стикається при розробці алгоритмів, пов'язана з тим, що застосовувані сигнали в сучасних РТС за своєю структурою є зазвичай складними [1]. Створення для таких сигналів оптимальних фільтрів являє собою досить складне завдання. Рішенням перерахованих вище завдань присвячено ця робота.

**Мета статті.** Розгляд та дослідження основних принципів, на яких засновані запропоновані алгоритми обробки сигналів НКВ: нормалізація перетворення випадкових процесів; аналіз точок перетину нульового рівня з метою розгляду можливості побудови алгоритму обробки сигналу НКВ; статистична лінійна інтерполяція в функціональних перетворювачах дискретного типу.

### Основна частина

В статті розглядаються алгоритми цифроаналогової обробки і проводиться порівняльна оцінка різних алгоритмів сигналів НКВ і напрямки практичної реалізації цих алгоритмів.

Перш за все, досліджено особливості нелінійних перетворень випадкових процесів, що нормалізують розподілу ймовірностей при ідентифікації сигналів НКВ.

Випадкові процеси в реальних РТС, як правило, відрізняються від нормальних [3].

В якості аномальних розподілів ймовірностей випадкових процесів найчастіше проявляються процеси з розподілами, що мають "обтяжені хвости" [4]. Таким розподілом є, наприклад, розподіл ймовірностей Тьюкі [5,6]. Це розподіл випадкової величини  $x(t)$  являє собою безліч розподілів, визначених стандартним нормальним розподілом  $N_1(0,1)$  і так званним "засмічуючим" нормальним розподілом  $N_2(\alpha, \sigma)$

$$\rho(x) = (1 - E)N_1(0,1) + EN_2(\alpha, \sigma)$$

де  $E$  - постійна, що характеризує ступінь "засмічення" випадкового процесу.

Перетворення випадкового процесу позначимо

$$y = f(x),$$

де  $x(t)$  - вихідний випадковий процес;  $y(t)$  - перетворений випадковий процес, що має нормальний розподіл ймовірностей  $p(y)$ . Функціональна схема перетворювача, що реалізує цей розподіл, наведена в [7,8]. При цьому необхідно знайти функцію  $y(x)$ , що мінімізувала функціонал

$$F = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi \{p(x) = p(f)\dot{f}\} dx,$$

де  $\Phi \{p(x) = p(f)\dot{f}\} \geq 0$ , зокрема

$$\Phi \{p(x) = p(f)\dot{f}\} = \{p(x) = p(f)\dot{f}\}^2; \quad p(x) \in W_X,$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1, \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(y) dy = \int_{-\infty}^{\infty} p(f) f dx = 1. \quad (2)$$

При цьому рішення функціонала (2) може бути знайдено в результаті інтегрування рівняння Ейлера-Лагранжа [9,10] при виконанні умов (1) і (2).

$$\Phi_f - \frac{d}{df} \Phi_f = 0.$$

Для демонстрації вищевикладеного, прийємо розподілу  $p(x)$  рівним

$$p(x) = (1 - E)k_1 e^{-\frac{x^2}{k_2}} + Ek_3 e^{-\frac{x^2}{k_4}} \quad (3)$$

де для випадку [86]  $E = 0,4$ ;  $k_1 = 0,4$ ;  $k_2 = 2$ ;  $k_3 = 0,08$ ;  $k_4 = 50$ . Розподіл ймовірностей  $p(y)$  прийємо нормальним з параметрами  $N\{0, 1\}$ .

Розглянемо в силу симетрії  $p(x)$  і  $p(y)$  – області зміни  $x$  і  $y \in [0, \infty]$ . При цьому для  $x \in [0, \infty]$  вирази (2) і (3) приймуть вигляд

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 0,5 \quad (4)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(f) f dx = 0,5 \quad (5)$$

Незалежні змінні, за якими проводяться інтегрування в (4) і (5), збігаються. Функції  $p(x)$  і  $p(f) = P(y)$  пов'язані перетворенням  $y = f(x)$ , отже справедливо

$$p(f) f df = p(x) dx \quad \text{або} \quad p(f) f = p(x) \quad (6)$$

Підставляючи в (6) значення  $p(x)$  і  $p(f)$ , визначені виразами (4) і (5), інтегруючи (6), отримаємо

$$f(x) = -0,75 \ln \left( 0,6 e^{\frac{-x}{0,75}} + 0,2 e^{\frac{-x}{2}} + 0,2 \right)$$

З аналізу цього виразу випливає, що функція  $y = f(x)$  перетворює випадковий процес  $x(t)$  з "подовженими хвостами" у випадковий процес з нормальним розподілом, здійснюючи "стиснення"  $x(t)$ . Отримане перетворення  $y = f(x)$  може бути реалізовано досить простими методами Один з можливих розглянуто в цьому підрозділі при аналізі аналогоцифрових фільтрів.

Обробка сигналів НКВ на основі аналізу точок перетину нульового рівня дозволяє удосконалювати алгоритм цієї обробки, використовуючи в якості носія повідомлення фази сигналу. Для цього представимо процес на виході частотно-виборчої ланцюга у вигляді адитивної суміші детермінують  $a(t)$  і випадкової  $v(t)$  складових

$$h(t) = \alpha(t) + b(t) = A(t) \cos(\omega t + \phi_u) + B(t) \cos(\omega_1 t + \phi_i)$$

З умов функціонування БРТС прийємо, що середні частоти детермінованою  $\omega = 2\pi f$  і випадкової  $\omega_1 = 2\pi f_1$  складових різні

$$f_n - f = \Omega \quad (7)$$

При цьому величина  $\Omega$ , як правило, обумовлена неточною настройкою виборчої ланцюга.

Припустимо також, що у складовій  $v(t)$  – вузько смугова дифференціююча випадкова функція

розподілена по гаусівському закону із статистичними характеристиками: дисперсія а й математичне сподівання  $M_1 = 0$  У цьому випадку щільність розподілу перетину певного рівня і щільність розподілу похідних  $v$  дорівнюють відповідно:

$$P(h, t) = \int_0^{\infty} p(h, \dot{h}, t) \dot{h} dh; \quad (8)$$

$$P(\dot{h}, t) = \frac{p(h, \dot{h}, t) \dot{h}}{\int_0^{\infty} p(h, \dot{h}, t) dh}, \quad (9)$$

де  $p(h, \dot{h}, t)$  – щільність розподілу координати  $h(t)$  та її похідної  $\dot{h}(t)$  в співпадаючі моменти часу. Щільність розподілу величини  $h(t)$  подамо у вигляді нормальної щільності розподілу величини  $B(t)$  із середнім значенням  $\alpha(t)$

$$P(h, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \exp\left\{-\frac{[h - \alpha(t)]^2}{2\sigma_1^2}\right\}. \quad (10)$$

Похідна величина  $\dot{h}(t)$  також розподілена за нормальним законом

$$P(\dot{h}, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}} \exp\left\{-\frac{[\dot{h} - \dot{\alpha}(t)]^2}{2\sigma_2^2}\right\}, \quad (11)$$

де  $\sigma_2^2 = \sigma^2 \omega_1^2$ ;  $\omega_1^2$  – середня квадратична частота випадкового процесу, визначена через спектральну щільність  $S_B(\omega)$  на виході частотно-виборчої ланцюга, парну щодо  $\omega_n$ , і функцію кореляції  $R(\tau)$  відповідно

$$\omega_1^2 = \int_0^{\infty} \omega S_B(\omega) d\omega; \quad \omega_1^2 = -\ddot{R}(0)$$

Двохмірний спільний розподіл (10) і (11) можна записати у вигляді

$$P(h, \dot{h}, t) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \times \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[ \frac{(h - \alpha(t))^2}{\sigma^2} + \frac{(\dot{h} - \dot{\alpha}(t))^2}{\sigma_2^2} \right]\right\} \quad (12)$$

Отриманий вираз (12) дозволяє знайти функції розподілу щільності ймовірності в точках нулів і похідних у цих точках суміші сигналу і шуму.

Визначимо щільність розподілу нулів для безперервного та імпульсного сигналів  $a(t)$ . У разі безперервного сигналу  $A(t) = A = \text{const}$ :

$$P(0, t) = \frac{k_1 \sigma_2}{2\pi\sigma} \left\{ 1 + \frac{\dot{\alpha}(t)}{\sigma_2} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(\frac{\dot{\alpha}(t)}{\sigma_2^2}\right) \left[ 1 + \exp\left(\frac{\alpha(t)}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) \right] \right\} \times \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[ \frac{\alpha^2(t)}{\sigma^2} + \frac{\dot{\alpha}^2(t)}{\sigma_2^2} \right]\right\} \quad (13)$$

Для визначення нормуючого множника  $k_i$ , покладемо  $a(t)$  рівним нулю, що відповідає рівномірному розподілу нулів. Тоді при вимірюванні аргументу функції  $P(0,t)$  в радіанах має вигляд

$$P(h, t) = \frac{\dot{h}}{\sigma\omega_1^2} \exp\left[\frac{\dot{h} - 2h\dot{\alpha}(t)}{2\sigma\omega_1^2} - \frac{\dot{\alpha}(t)}{4\sigma\omega_1^2}\right] \frac{1}{D_{-2}\left(-\frac{\alpha(t)}{\sigma\omega_1}\right)} \quad (14)$$

де  $D_{-2}(\cdot)$  – функція параболічного циліндра.

При відсутності сигналу ( $a(t) = 0$ ) розподіл збігається з релеїським розподілом

$$P(\dot{h}, t) = p(\dot{h}) = \frac{\dot{h}}{\sigma\omega_1^2} \exp\left\{-\frac{\dot{h}^2}{2\sigma\omega_1^2}\right\}$$

Для більших значень  $h$ , обмежуючись першими двома членами розкладання експоненти функції (13), рівняння (14) можна привести до вигляду

$$P(\dot{h}, t) = \frac{\dot{h}}{\sigma\omega_1^2 D_{-2}\left(\frac{\alpha(t)}{\sigma\omega_1}\right)} \exp\left\{1 - \frac{\dot{h}^2 - 2h\dot{\alpha}(t) \dot{\alpha}^2(t)}{2\sigma^2\omega_1^2} - \frac{\dot{\alpha}^2(t)}{4\sigma\omega_1^2}\right\} \quad (15)$$

Отримані вирази (13) – (15) дають можливість визначити необхідний коефіцієнт посилення  $K_y$  пристрої, що передусє вимірювачу сигналу НКВ. При цьому для визначення  $K_y$  достатньо обмежитися областю малих значень похідних.

Алгоритми ідентифікації на основі динамічних моделей розроблені у вигляді рекурентних співвідношень, як для критерію максимуму правдоподібності, так і для критерію максимуму апостеріорної ймовірності розподілу оцінюваного параметра. Даний метод необхідно використовувати для контролю космічного простору в умовах малопунктної мережі вимірювальних засобів з метою підвищення ймовірності аналітичної інформації про КА, а також у випадках виявлення та взяття на супровід некаталогізованих об'єктів (рис. 1).

Застосування наведених алгоритмів дозволяє виконати обробку сигналів МКІ для ідентифікації КА в широкому діапазоні розподілених перешкод в РТС. При цьому характеристики алгоритмів при малих відносинах сигнал-шум, що особливо характерно при ідентифікації КА за сигналами НКВ, збігаються з характеристиками для випадку лінійного оптимального фільтра і гауссових перешкод тієї ж потужності. Крім того, розроблені алгоритми дискретного типу дозволяють значно знизити вимоги до швидкодії застосовуються в системах ідентифікації КА обчислювальних засобів і підвищити оперативність всієї системи контролю космічного простору в цілому.

На основі проведених досліджень розробимо координатний метод ідентифікації КА, що базується на знанні параметрів орбіт космічних об'єктів, так званих початкових умов. В основу методу покладено завдання збору аналітичної інформації про КО, шляхом аналізу неконтрольованих випромінювань

постійно діючих блоків бортової апаратури, яка дає змогу забезпечити ідентифікацію космічних апаратів в умовах малопунктної мережі вимірювальних засобів з метою підвищення істинності аналітичної інформації про КА.

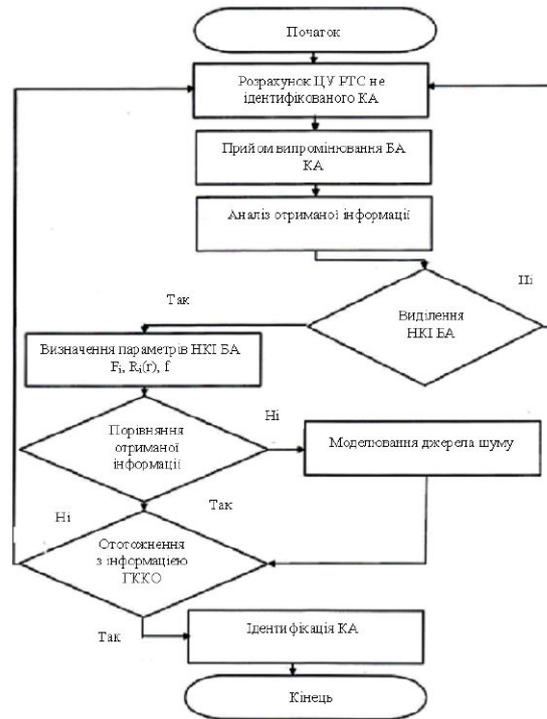


Рис. 1. Метод ідентифікації КА за НКВ БА

Для вирішення завдання ідентифікації космічних об'єктів використовується контроль випромінювань БА, а саме частоти коливань задаючих генераторів. Проведення ідентифікації КА по НКВ гетеродинів приймального тракту увазі аналіз характеру зміни параметрів коливань гетеродина і виділення ознак, які відрізняють коливання одного генератора від іншого.

Сутність методу полягає в наступному: в умовах малопунктної мережі вимірювальних засобів збільшення кількості КО призводить до того, що високоточних відомостей про параметри орбіт недостатньо для виконання завдань контролю і аналізу космічної обстановки, тому ідентифікація КА, на основі аналізу особливостей НКВ, отримує особливу актуальність.

Для вирішення поставленого завдання пропонується використовувати спектральне визначення нестабільності, при якій розглядається розподіл щільності потужності фази або частоти сигналу генератора. При цьому вона визначається виразом

$$F_\varepsilon = 4 \int_0^\infty R_\varepsilon(r) \cos(2\pi fr) dr$$

де  $R_\varepsilon(r)$  – функція автокореляції;  $f$  – частота сигналу;  $r$  – інтервал усереднення при зміні частоти.

Щільність розподілу потужності процесу нестабільності надзвичайно складно оцінити безпосередніми вимірами, тому що її складові малі в порівнянні з потужністю складовою основної частоти. Більш доступними є вимірювання часових характеристик нестабільності частоти.

Таким чином метод ідентифікації КА по НКВ полягає в аналізі випромінювання бортової апаратури виявленого КО і зіставленні з математичними моделями процесів які ідентифікуються, що дозволить підвищити якість функціонування системи контролю космічного простору, а також забезпечить додаткові відомості про роботу БА КА, і відрізняється тим, що дозволяє класифікувати КО по особливостям роботи внутрішніх систем функціонуючих КА в пасивному режимі локації.

### Висновки

У рамках даної статті приведена практична реалізація алгоритмів обробки сигналів неконтрольованих випромінювань РТС. При побудові алгоритмів обробки сигналів НКВ стикаються з факторами: врахування впливів РТС, які відмінні від гаусівських; сучасних РТС РКК за своєю структурою складні. Створення для таких сигналів оптимальних фільтрів являє собою досить складне завдання. При цьому розглянуті основні принципи, на яких засновані запропоновані алгоритми обробки сигналів НКВ. Розглянуті алгоритми цифро-аналогової обробки і проведені порівняльні оцінки різних алгоритмів сигналів НКВ і напрямки практичної реалізації цих алгоритмів.

### Список літератури

1. Пестряков В.Б., Кузенков В.Д. Радиотехнические системы. – М.: Радио и связь, 1985. – 376 с.
2. Пенин П.И., Филиппов Л.И. Радиотехнические системы передачи информации. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
3. Петров Н.Н. Системы и комплексы технических средств местоопределения подвижных объектов // <http://st.ess.ru/redaction/index.htm>
4. Погорелов А.И., Купченко Л.Ф. Общие вопросы построения сигналов измерительных радиосистем // Пространственно-временная обработка сигналов.– Харьков: ХАИ, 1986.– С.3–11.
5. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации/ Под ред. А.Г. Зюко. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.
6. Попович П.Р., Скребушевский Б.С. Баллистическое проектирование космических систем. – М.: Машиностроение, 1987. – 340 с.
7. Моргунов О.А., Поляков О.Л., Богдановский О.М. Алгоритм идентификации космических аппаратов по неконтролируемым излучениям бортовой аппаратуры // Системы озброєння і військова техніка. – 2007. – Вип. 2(10). – С. 18–20.
8. Окунев Ю.Б. Теория фазоразностной модуляции.–М.: Связь.– 1979.– 216 с
9. Попович П.Р., Скребушевский Б.С. Баллистическое проектирование космических систем. – М.: Машиностроение, 1987. – 340 с.
10. Прикладные математические методы анализа в радиотехнике/ Ю.А. Евсиков, Г.В. Обрезков, В.Д. Разевиг, В.В. Чапурский, В.М. Чиликин/ Под ред. Г.В. Обрезкова. – М.: Высшая школа, 1985. – 343 с.

Надійшла до редколегії 22.01.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Державний університет телекомунікацій, Київ.

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

О.В. Шульга

Определено, что плотность распределения мощности процесса нестабильности чрезвычайно сложно оценить непосредственными измерениями, так как ее составляющие малы по сравнению с мощностью составляющей основной частоты. Более доступными являются измерения временных характеристик нестабильности частоты. Описанный метод идентификации космических аппаратов (КА) по неконтролируемым излучениям (НКИ), который заключается в анализе излучения бортовой аппаратуры обнаруженного космического объекта (КО) и сопоставлении с математическими моделями процессов, которые идентифицируются, что позволит повысить качество функционирования системы контроля космического пространства, а также обеспечит дополнительные сведения о работе бортовых аппаратов (БА) КА, и отличается тем, что позволяет классифицировать КО по особенностям работы внутренних систем функционирующих КА в пассивном режиме локации.

**Ключевые слова:** космический аппарат, идентификация, система контроля космического пространства, локация, плотность мощности, колебания гетеродина, динамическая модель, кусочно-линейная аппроксимация.

### PRACTICAL IMPLEMENTATION OF RADIO STATIONS UNCONTROLLED RADIATION SIGNAL PROCESSING ALGORITHMS

O.V. Shulga

It was determined that the density power distribution process instability is extremely difficult to assess the direct measurements, since its components are small compared with the power of the fundamental frequency component. More accessible are measuring timing frequency instability. This method of identification of spacecraft (SC) on uncontrolled emissions (UCE), which is the emission analysis of airborne detection equipment space object (SO) and compared with mathematical models of the processes that are identified that will improve the quality of functioning of space control system, as well as provide additional information on the work onboard apparatus (OA) spacecraft, and is different in that it allows to classify SO on the specifics of the internal systems of the spacecraft operating in a passive mode location.

**Keywords:** spacecraft, identification, control of space, location, power density, fluctuations in the local oscillator, the dynamic model, piecewise linear approximation.