

3. Вопросы математической теории надёжности / Под. ред. Б.В. Гнеденко. – М. : Радио и связь, 1983. – 374 с.

4. Глазунов Л.П. Основы теории надежности автоматических систем управления / Глазунов Л.П., Грабовецкий В.П., Щербаков О.В. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.

Рецензент: д.т.н. Троцишин І.В.

Надійшла 16.2.2012 р.

УДК 621.396.96

В.Б. РУДНИЦЬКИЙ, І.І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ, Л.В. КАРПОВА, С.В. МАРЦЕНЮК

Хмельницький національний університет

## ПІДВИЩЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ НАПІВАКТИВНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ЗАСОБІВ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМУ КОРЕЛЯЦІЙНОГО ОЦІНЮВАННЯ СУМІШІ ЕХО-СИГНАЛІВ

*В статті запропоновано метод обробки радіолокаційних ехо-сигналів на основі алгоритму додаткового автокореляційного оцінювання комплексної обвідної ехо-суміші, що дає змогу реалізувати наявну амплітудну та кутову модуляцію в радіолокаційних сигналах навіть без попередньої їх оцінки. Отримано ряд аналітичних виразів функцій невизначеності радіолокаційних сигналів при їх амплітудній та кутовій модуляції випадковими процесами з різними законами розподілу.*

*The paper proposed a method of processing radar echo signals based on the autocorrelation algorithm further evaluation of the complex envelope of the echo-mix that you can implement existing amplitude and angular modulation of radar signals even without their preliminary evaluation. A series of analytical expressions of uncertainty functions of radar signals in their amplitude and angular modulation of random processes with different laws of distribution.*

Ключові слова: ехо-сигнал, алгоритм, кореляція, закони розподілу.

Дослідження недетермінованої моделі імпульсного радіолокаційного сигналу [3] показує наявність потенційної можливості щодо покращення характеристик активних та напівактивних радіолокаційних засобів. Це обумовлено наявністю додаткової амплітудної та кутової модуляції в зондуємому сигналі [2], а отже і вищими їх потенційними можливостями. Проте, недетермінованість модулюючих складових, через їх флуктуаційну природу, не дає змоги застосувати оптимальний (узгоджений) алгоритм, а отже вони носять паразитний характер і єдиним можливим виходом, що застосовується на сьогоднішній день, є максимальна їх компенсація [1].

В статті пропонується дещо альтернативний підхід, а саме метод, що базується на використанні автокореляційних властивостей сигналу, при оцінці яких однаково враховуються як детерміновані, так і недетерміновані складові. Основна ідея методу базується на тому, що при напівактивній радіолокації всі ехо-сигнали в одному періоді зондування корельовані між собою як за детермінованими, так і за недетермінованими складовими [3,1].

Математична модель групового ехо-сигналу – суміші ехо-сигналів від  $M$  – цілей, без урахування шумів та завад, може бути представлена у такому вигляді:

$$\mathbf{u}_{sp}(t) = \sum_{n=1}^M A_n U(t-t_n) x_u(t-t_n) \exp j(\omega_0 t + \omega_n(t-t_n) + j_0 + j_n + x_j(t-t_n)), \quad (1)$$

де  $\omega_n = \frac{4\pi\vartheta_{rn}}{\lambda}$  – доплерівське зміщення частоти;  $\varphi_n = \frac{2\omega_0 D_n}{c}$  – фазовий зсув ехо-сигналу;  $\vartheta_{rn}$  – радіальна швидкість  $n$ -ї цілі (елементу цілі);  $D_n$  – відстань до  $n$ -ї цілі (елементу цілі).

Цей вираз містить сигнали з певними амплітудними і кутовими відмінностями, що вносяться при відбитті від різних цілей (елементів), проте всі вони мають ідентичні флуктуаційні амплітудні і кутові модуляційні складові, внесені ще при формуванні зондуємого сигналу. Через флуктуаційну природу цих складових, синтезувати оптимальну їм структуру алгоритму обробки неможливо, а можливо реалізувати лише оптимальний алгоритм по усереднених значеннях, який в реальних умовах є більше раціональним, ніж оптимальним.

Для оцінки потенційних можливостей розрізнення ехо-сигналів в такій суміші, необхідно проаналізувати її кореляційну функцію, яку зручніше виразити через комплексну обвідну.

Комплексна обвідна суміші ехо-сигналів (1) має вигляд:

$$\mathbf{u}_{sp}(t) = \sum_{n=1}^M A_n U(t-t_n) x_u(t-t_n) \exp j[\omega_n(t-t_n) + x_j(t-t_n)] \exp j\varphi_n. \quad (2)$$

Як відомо із теорії кореляційного аналізу, кореляційна функція адитивної суміші комплексних обвідних (2) може бути представлена у вигляді суми взаємокореляційних функцій комплексних обвідних окремих ехо-сигналів:

$$B(\tau) = \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M B_{n,m}(\tau), \quad (3)$$

або в матричному вигляді:

$$B_{n,m}(\tau) = \begin{pmatrix} B_{1,1}(\tau) & \dots & B_{1,M}(\tau) \\ \dots & \dots & \dots \\ B_{M,1}(\tau) & \dots & B_{M,M}(\tau) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Простий логічний аналіз матриці (4) показує, що елементи на головній діагоналі приймають максимальні значення при  $\tau = 0$ , а враховуючи ширину кореляційної функції прямокутного імпульсу можуть приймати ненульові значення тільки в межах ширини ( $|\tau_{0,5}|$ ) основної пелюстки кореляційної функції кожного з ехо-сигналів в суміші, тобто

$$\text{при } n = m, \begin{cases} B_{n,m}(\tau) = \max, & \tau = 0, \\ B_{n,m}(\tau) \neq 0, & \tau \geq |\tau_{0,5}|, \\ B_{n,m}(\tau) = 0, & \tau > |\tau_{0,5}|. \end{cases} \quad (5)$$

Властивості кореляційної функції при  $n \neq m$  мають наслідком такі твердження:

$$B_{n,m}(\tau) = B_{m,n}(\tau),$$

$$\sum_{n,m} B_{n,m}(0) \geq 2 \sum_{n=1}^M \sum_{m=n+1}^M B_{n,m}(\tau), \quad (6)$$

З (6) можна зробити такі висновки:

- на графіку автокореляційної функції суміші ехо-сигналів завжди буде присутня складова  $B(0)$  незалежно від значення  $M$ , при чому для  $M = 0$  значення  $B(0)$  буде визначатися енергією шумів;
- на графіку автокореляційної функції суміші ехо-сигналів буде присутня тільки одна складова  $B(0)$  як за  $M = 0$  так і за  $M = 1$ , що фактично означає неспроможність автокореляційного алгоритму виявляти ехо-сигнали, а тільки їх розрізняти;

- максимальне значення взаємкореляційних членів  $B_{n,m}(\tau)$ , для  $n \neq m$  не перевищує  $\frac{1}{2} \sum_{n,m} B_{n,m}(0)$ ;
- автокореляційне оцінювання має сенс лише за умови, що тривалість імпульсу значно більша за ширину основної пелюстки автокореляційної функції  $\tau_i \gg |\tau_{0,5}|$ .

Таким чином, алгоритм автокореляційного оцінювання має сенс тільки у вигляді додаткового каналу обробки ехо-сигналів, а не основного і є ефективним лише за наявності значної додаткової модуляції не залежно від її детермінізму (природного або штучного походження).

Структурна схема приймача, що реалізує метод підвищення ступеня розрізнення радіолокаційних ехо-сигналів на основі алгоритму автокореляційного оцінювання приведено на рис. 1.

Відповідно цієї структурної схеми, обробка ехо-сигналів з використанням недетермінованих кореляційних властивостей здійснюється в два етапи: на першому здійснюється виявлення в основному каналі приймання (встановлення факту наявності корисного сигналу); на другому - оцінюється кількість ехо-сигналів в суміші за її кореляційними властивостями.

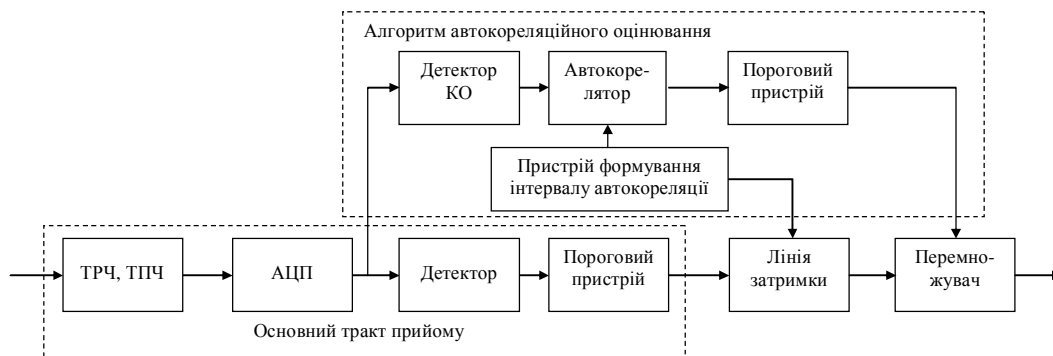


Рис. 1. Структурна схема приймача РЛС, що реалізує запропонований метод

На першому етапі, за класичним алгоритмом проводимо виявлення ехо-сигналів. Алгоритм є оптимальним для прямокутної форми комплексної обвідної і забезпечує розділення ехо-сигналів тільки за

умови їх рознесення в часі. На другому етапі, коли встановлено факт наявності ехо-сигналу і враховуючи, те що всі ехо-сигнали в межах періоду зондування корелюють між собою як за детермінованими, так і за недетермінованими складовими, для розрізнення окремих сигналів в суміші оцінюємо її автокореляційну функцію. При цьому, ступінь розрізнення окремих сигналів у суміші визначає ширина основної пелюстки зонduючого сигналу з урахуванням недетермінованих модуляційних складових, яка за певних умов (природної нестабільності зонduючого сигналу), може бути значно вужчою, як це було показано в першому науковому результаті.

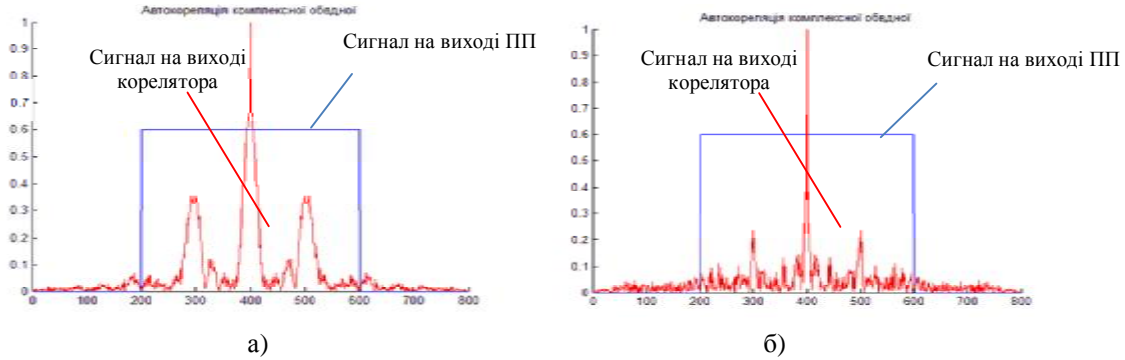


Рис. 2. Автокореляція комплексної обвідної суміші ехо-сигналів: а) при відношенні сигнал/шум на виході детектора комплексної обвідної +10 дБ; б) при відношенні сигнал/шум на виході детектора комплексної обвідної 0 дБ.

Відповідно отриманих результатів, було проведено. Як видно із результатів імітаційного моделювання, урахування автокореляційних властивостей комплексної обвідної зонduючих сигналів призводить до значного підвищення ступеня їх розрізнення.

На рисунках 2, а та 2, б показана форма автокореляційної функції двох ехо-сигналів з прямокутною обвідною та лінійною частотною модуляцією при різних девіаціях частоти, що фактично відповідає різній ширині смуги пропускання приймача та при різному відношенні сигнал/шум на виході детектора комплексної обвідної.

Як видно з графіків, не залежно від детермінованості комплексної обвідної її кореляційні властивості достатньо ефективно можуть бути застосовані. Проте, при дії шумів, за рахунок різкого спаду рівня взаємкореляції ехо-сигналів, картина погіршується, хоча при певному рівні взаємкореляційні відгуки все ще чітко проглядаються.

Таким чином, стає очевидним обмеження застосування методу, яке полягає в наступному: підвищення розрізнення ехо-сигналів можливе лише за умови стійкого їх приймання, за якого забезпечується детектування їх комплексної обвідної з відношенням сигнал/шум не гірше 0 дБ. Це саме підтверджується графіками залежності рівня взаємкореляційних складових по відношенню до сумарної енергії в залежності від співвідношення сигнал/шум комплексної обвідної, що показані на рис. 3.

Як видно з графіків, тільки на рівні 0 дБ спостерігається сплеск у всіх випадках, незалежно від корельованості комплексної обвідної самого зонduючого сигналу. Проте, при відношенні сигнал/шум вище 1 дБ виграш від застосування методу в значній мірі залежить від форми комплексної обвідної зонduючого сигналу, при чому, на що слід наголосити – незалежно від її детермінованості.

Експериментальні дослідження та імітаційне моделювання, результати яких наведені на рис. 4 у вигляді графіків залежності відношення сигнал/шум на виході детектора від співвідношення ширини спектру сигналу до ширини смуги пропускання приймача показали, що в залежності від форми комплексної обвідної (яка визначається типом генератора НВЧ, способом побудови модулятора та його режимом роботи), скорочення тривалості зонduючого сигналу при постійній ширині смуги пропускання приймача дає змогу отримати вираш в роздільній здатності в межах декількох разів при збереженні відношення сигнал/шум, або підвищити відношення сигнал/шум за рахунок звуження смуги пропускання приймача при

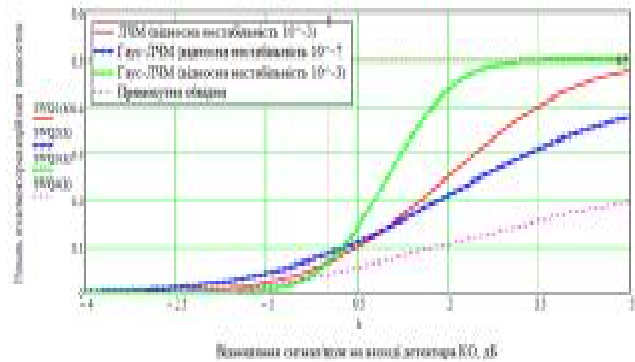


Рис. 3. Залежність нормованого рівня взаємкореляційних членів від відношення сигнал/шум на виході детектора комплексної обвідної

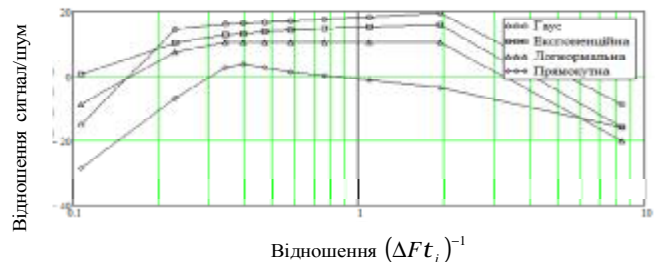


Рис. 4. Зміна відношення сигнал/шум при різному співвідношенні смуги пропускання та тривалості імпульсу

## Література

1. Вопросы перспективной радиолокации : [монографія] / Под редакцией А.В. Соколова. – М. : Радиотехника, 2003 – 512 с.
2. Передающие устройства СВЧ : учебное пособие для радиотехнических спец. вузов / Вамберский М.В., Казанцев В.И., Шелухин С.А. ; под ред. М.В. Вамберского. – М. : Высш. шк., 1984. – 448 с.
3. Карпова Л.В. Метод підвищення ступеня розрізнення ехо-сигналів при вирішенні задач активної та напівактивної радіолокації на основі кореляційного оцінювання квадратурної флуктуаційної складової / Карпова Л.В. // Вісник Хмельницького національного університету. Хмельницький. Технічні науки. – Хмельницький, 2010. – № 4. – С. 72–76.

Рецензент: д.т.н. Шинкарук О.М.  
Надійшла 7.2.2012 р.

УДК 621.396.96

В.Б. РУДНИЦЬКИЙ, І.І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ, О.С. ІВАНЮК  
Хмельницький національний університет

### ОЦІНКА СТУПЕНЯ РОЗРІЗНЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ РАДІОСИГНАЛІВ З УРАХУВАННЯМ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ В ЇХ КОМПЛЕКСНІЙ ОБВІДНІЙ

*В статті досліджуються питання трансформування кореляційних властивостей радіолокаційних сигналів при урахуванні флуктуаційних амплітудних та кутових складових. Отримані аналітичні вирази щільностей розподілу випадкових складових в комплексній обвідній радіолокаційних сигналів для різних варіантів реалізації імпульсних модуляторів та різних типів генераторів НВЧ.*

*The article investigates the question of transforming the correlation properties of radar signals with allowance for fluctuation amplitude and angular components. Analytical expressions of the distribution of random components in the complex bypass signals for different variants of pulse modulators and generators for various types of microwave.*

Ключові слова: зонduючий радіосигнал

При реалізації методів активної радіолокації, джерелом інформації про наявність і характеристики цілей в зоні спостереження є радіолокаційні сигнали, в результаті чого, саме їх потенційні можливості (енергетичні та кореляційні) визначають ефективність радіолокаційних засобів, на їх основі, в цілому. З цієї причини, основні зусилля інженерів при розробці радіолокаційних засобів були спрямовані на пошук зонduючих сигналів з оптимальними характеристиками [2, 3]. В першу чергу, намагались оптимізувати кореляційні властивості сигналів, оскільки пропорційною їм є ефективність узгоджених (оптимальних) методів їх обробки. При ускладненні зонduючих сигналів, значно підвищувались вимоги до передавачів, оскільки неточність в відтворенні складних сигналів, значно сильніше знижує ефективність алгоритмів обробки ніж при використанні простих зонduючих імпульсів. Проте, незважаючи на те, що в сучасній радіолокації існує жорстке правило, відповідно якого ступінь розрізнення ехо-сигналу не може перевищувати ступінь розрізнення зонduю чого [1, 3], в ряді робіт показано, що існування різних дестабілізуючих факторів при формуванні зонduючих сигналів призводить до появи в них певних позитивних властивостей. Не зважаючи на те, що в межах періоду зондування, за своєю природою вони є недетермінованими, кореляція ехо-сигналів значно відрізняється від кореляції зонduючих, а це відкриває потенційні можливості підвищення ряду характеристик радіолокаційних засобів активного та напівактивного типу.

В даній статті на основі теоретичного аналізу процесів, що протікають в імпульсних генераторах НВЧ та експериментального дослідження імпульсних передавачів НВЧ діапазону на їх основі, отримана удосконалена математична модель імпульсного зонduючого радіосигналу з урахуванням статистичних моделей амплітудних та кутових флуктуацій в його комплексній обвідній.

В основу змісту даної моделі покладено загально прийнятий вираз, що описує імпульсний зонduючий радіосигнал:

$$u(t) = U_0 \exp j(\omega_0 t), \quad (1)$$

де  $U_0(t) \exp j(\varphi(t) + \varphi_0)$ , – комплексна обвідна;

$U(t)$  – форма модулюючого по амплітуді сигналу;  $\varphi(t)$  – форма кутової модулюючої складової.

При реалізації радіолокації сигналами з малою базою ( $B \approx 1$ ), як правило використовуються імпульсні зонduючі радіолокаційні сигнали з прямокутною обвідною і без внутрішньої кутової модуляції. Форма комплексної обвідної, а відповідно і кореляційні властивості такої моделі сигналу, визначаються виключно формою модулюючого по амплітуді імпульсу [1]. Зрозуміло, що саме така форма комплексної обвідної є основою для синтезу узгодженого алгоритму обробки в приймачі і як відомо, потенційне