С.В. Яровий, О.Л. Кузнєцов

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ПОКРАЩЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ПРИ СПЕКТРАЛЬНОМУ АНАЛІЗІ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

Розглядається задача підвищення ефективності спектрального аналізу радіолокаційних сигналів на фоні шуму за рахунок покращення роздільної здатності. В основу покладена класична операція деконволюції спектра сигналу, яка виконується з використанням фільтра Вінера. Виявлення окремих сигналів здійснюється порівнянням із адаптивним порогом, який формується з урахуванням фонові складової для розділення сигналу і шуму, і локальної складової для видалення заважаючих сателітних піків сигналу, обумовлених обробкою сигналів у приймальному тракті радіолокаційної станції. Для підвищення роздільної здатності застосована нелінійна операція диференціювання результату порогової обробки.

Ключові слова: нелінійна деконволюція, роздільна здатність, спектральний аналіз, фільтр Вінера.

Вступ

Постановка проблеми. Основною задачею обробки радіолокаційної інформації в приймальному тракті радіолокаційної станції (РЛС) є виявлення сигналів – виявлення їх максимумів (піків), а в подальшому – визначення їх доплерівської частоти. В сучасних РЛС така задача вирішується доплерівськими фільтрами. У цьому випадку роздільна здатність за частотою відіграє важливу роль. Спектри ехо-сигналів в процесі обробки приймальним трактом викривляються, піки розпливаються, їх ширина збільшується, і роздільна здатність у процесі виміру погіршується. Як правило, функцію, яка характеризує ступінь викривлення форми сигналу приймальним трактом, трасою поширення радіохвиль у тропосфері, прийнято називати апаратною функцією. Одним із шляхів ефективного розділення близькорозташованих сигналів є відновлення вихідного спектру сигналу, який є невикривленим апаратною функцією.

У загальному випадку задача відновлення викривленого спектру сигналу при наявності шумів зводиться до рішення лінійного інтегрального рівняння 1-го порядку

$$\int_a^b h(x, y)s(y)dy + n(x) = u(x), \quad c \leq x \leq d, \quad (1)$$

де $h(x, y)$ – апаратна функція;

$s(x)$ – шукана функція (спектр сигналу);

$u(x)$ – сигнал на виході узгодженого фільтру приймального тракту РЛС;

$n(x)$ – нормальний шум приймального тракту.

Для випадку стаціонарних параметрів тракту його апаратна функція залежить лише від різниці аргументів

$$h(x, y) = h(x - y) \quad (2)$$

Інтеграл у рівнянні (1) стає інтегралом згортки або конволюції (convolution), а задача відновлення сигналу зветься задачею деконволюції. Однак наявність складової шуму у рівнянні (1) робить задачу відновлення сигналу некоректною математичною задачею. Вона не має точного рішення і може бути вирішена тільки приблизно. При цьому вибір критерію оцінки наближення суттєво впливає на результат рішення.

Задача знаходження спектра, як правило, зводиться до визначення двох параметрів для кожного спектрального піка – частоти і величини (амплітуди або площі) піка. Таку інформацію можна представити як набір дельта-функцій із відповідними параметрами, і цей набір можна трактувати як вихідний спектр $s(x)$ обраної математичної моделі. При цьому апаратна функція $h(x, y)$ в рівнянні (1) буде характеризувати відхилення отриманного на виході приймального тракту спектру від “вихідного”, і буде визначатися як параметрами тракту, так й фізичними властивостями процесу.

У загальному випадку спектр прийнятого сигналу представлений набором спектральних піків і шумів, а також містить фонову складову. Фонові складові – чисельні бічні пелюстки спектра сигналу – обумовлені обмеженістю у тривалості корисного сигналу, що робить величину такого фону за віссю абсцис (частоти) частково обмеженою лише шириною смуги пропускання приймального тракту. За амплітудою фон для переважної більшості видів радіолокаційних сигналів не перевищує (25 – 35) % від максимальної амплітуди спектрального піка. У цьому випадку при обробці отриманої спектральної інформації важливо видалення фону. Математично ця операція виявляється далеко не тривіальною і час-

то призводить до значних математичних обрахунків. Тому при подальшій обробці важливо володіти інформацією про похибку усунення фону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі методи рішення задачі деконволюції умовно поділяються на дві великі групи – лінійні та нелінійні. Для багатьох задач визначені оптимальні рішення у замкнутому аналітичному вигляді. Більшість методів побудовані з використанням алгоритму швидкого перетворення Фур'є, саме він значно зменшує час, необхідний для виконання лінійних операцій.

Якщо за початкові умови задачі лінійної обробки прийняти такі:

- 1) сигнал є стаціонарним процесом;
- 2) в якості критерію оптимізації обраний мінімум середнього квадрату похибки;
- 3) використовується лінійна обробка інформації, то оптимальним рішенням є фільтр Вінера [1]:

$$W(\omega) = \frac{H^*(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \frac{P_N(\omega)}{P_S(\omega)}}, \quad (3)$$

де $H(\omega)$ – Фур'є-образ апаратної функції $h(t)$,

$H^*(\omega)$ – спряжена величина;

$P_S(\omega)$ і $P_N(\omega)$ – спектральні щільності енергії сигналу і шуму. Апаратна функція $h(t)$ в цій задачі представляє собою по формі і ширині сам невикривлений сигнал.

Лінійний фільтр Вінера реалізує теоретичну межу розділення сигналів. Але чітке рішення задачі фільтра Вінера можливе тільки якщо відомі спектральні щільності енергії сигналу і шуму, що не завжди виконується. В цьому випадку можливе використання інших методів лінійної деконволюції. Наприклад:

- 1) фільтр Тіхонова [2], він не потребує інформації про спектральну щільність енергії сигналу;
- 2) узгоджений фільтр, він не потребує інформації про спектральну щільність енергії шуму [3];
- 3) згортка сигналу із другою похідною апаратної функції, він не потребує інформації ні про спектральну щільність сигналу ні шуму [4].

Разом із лінійними методами рішення задачі деконволюції широко застосовуються нелінійні [5–10], серед яких оптимальним в теорії радіолокації є метод максимуму правдоподібності, який дозволяє досягнути межі розділення. Майже всі вони дозволяють значно покращити розділення у порівнянні із фільтром Вінера, однак рішення задачі у кожному окремому методі виконується ітераційними способами і потребує великого об'єму розрахунків і часу. Роботи авторів [11–13] також присвячені питанням підвищення роздільної здатності за частотою, досягнення “надрозділення”. При вирішенні задачі “над-

розділення” популярними методами спектрального аналізу вважаються методи: MUSIC (і його різновид ROOT-MUSIC), SSA і ESPRIT [5–6; 10]. Недоліком останніх є необхідність оцінювання вибірових кореляційних матриць, що також пред'являє досить жорсткі вимоги до часових обчислювальних ресурсів системи обробки.

Бардіним Б.В. у роботі [14] запропонований спосіб поєднання лінійного способу обробки з швидко виконуємими нелінійними операціями, який і використаний для досягнення мети.

Метою статті є розробка пропозицій щодо покращення виявлення і розділення корисних сигналів у приймальному тракті шляхом відновлення їх спектральної структури, виконаним за рахунок поєднання лінійних методів обробки сигналів – фільтра Вінера із швидкими нелінійними операціями для досягнення покращення розрізнення сигналів.

Виклад основного матеріалу

В якості основного способу рішення задачі деконволюції приймається фільтр Вінера (3), для якого необхідно знати спектральну щільність сигналу і шуму. Однак, якщо в якості спектру досліджуваного сигналу прийняти послідовність дельта-функцій або імпульсний процес, то спектральна щільність такого процесу буде дорівнювати [6]:

$$P_S(\omega) = 2\pi a^2, \quad (4)$$

тобто буде константою.

де ν – середня частота подій (імпульсів);

a^2 – значення середнього квадрату амплітуд імпульсів. Ці характеристики вхідного сигналу можна визначити із вхідних експериментальних даних.

Відомо [10], що у приймальному тракті РЛС флуктуаційний шум – шум потоку елементарних часток (електронів, фотонів, іонів). Характеристики такого шуму дуже добре вивчені та математично описані. Флуктуаційний шум має рівномірний розподіл і є білим шумом. У такому випадку відношення у знаменнику виразу (3) – параметр регуляризації

$$\lambda(\omega) = P_N(\omega) / P_S(\omega), \quad (5)$$

стає константою.

Для виведення точного виразу для фільтра Вінера необхідно робити попередні дослідження характеристик шумів для різних типів задач. Але точне визначення характеристик шуму для приймального тракту передбачає складні дослідження, потребує значного часу, і, головне, такі дані швидко “старіють” через старіння функціональних елементів тракту і зміни умов локації. На практиці частіше всього на підставі попереднього досвіду в якості $\lambda(\omega)$ підбирають деяку константу. Типові значення такої константи мають значення в межах 10^{-2} – 10^{-8} . Для такої сигнально-шумової моделі реакція фільтра Ві-

нера (3):

$$S_v(t) = F^{-1} [W(\omega) \cdot F[S_{r0}(t) + n(t)]] \quad (6)$$

на модельний спектр відображена на рис. 1, а, б.

У формулі (6): $S_{r0}(t)$ – зареєстрований спектр при відсутності шумів, $n(t)$ – шум, $F[.]$ та $F^{-1}[.]$ – відповідно пряме і зворотнє перетворення Фур'є.

Рис. 1. Результат деконволюції спектру сигнала:

S_r – вхідний зареєстрований сигнал;

S_v – реакція фільтра Вінера

Джерело: [14, С. 77].

У моделі на рис. 1 спектр S_r складається із двох пачок по два гаусових піки. Перша (ліва) пачка складається із двох піків шириною 100 од., амплітудою 1000 од., і з відстанню між піками 80 од. Друга пачка містить три піки. Перші два піки мають ширину 100 од., амплітуду 1000 од. і відстань між ними 65 од. Третій пік має ширину 25 од., амплітуду 250 од. – він імітує бічну пелюстку, а відстань між другим і третім піками складає 75 од.

Апаратна функція $h(t)$ прийнята такою, що відповідає гаусовому піку шириною 100 од. Параметр регуляризації (5) фільтра Вінера прийнятий рівним $\lambda(\omega) = 2.5 \cdot 10^{-4}$. На рис. 1, а, шум відсутній – $n(t) = 0$. На інших рисунках доданий білий гаусовий шум. Відношення сигнал/шум дорівнює 10 на рівні 2 с.к.в.

Разом із проблемою бічних пелюсток спектра сигнала на виході узгодженого фільтра, існує інша – методологічна – реакція фільтра Вінера за межами

досліджуваного сигналу – піку або пачки піків. Це ефект Гібса на рис. 1, а [1; 15–16] – паразитні частотні піки, які можуть створювати проблеми виявлення корисних сигналів – і призводить до фіксації хибних піків (виявлень).

В моделі на рис. 1, б, до реакції фільтра додані шуми із тієї частини спектра вхідних шумів, які проходять через приймальний тракт та частотну характеристику фільтра, і тому лінійною фільтрацією їх не усунути. Ця проблема додає складнощів у задачу усунення хибних піків.

Для подавлення небажаних коливань і шумів там, де їх не повинно бути – у відсутності головного піку сигналу, в роботі [14] використана додаткова операція множення виходу фільтра Вінера на вхідний сигнал

$$S_v(t) = F^{-1} [W(\omega) \cdot F[S_{r0}(t) + n(t)]] \cdot S_{r0}(t) / An, \quad (7)$$

де An – нормуючий дільник, використаний для збереження розмірності, в якості його може бути використане максимальне або середнє значення сигналу.

Стосовно спектрального аналізу у приймальному тракті РЛС сигнал $S_{r0}(t)$ являє собою результат узгодженої фільтрації ехо-сигнала.

У такому разі фільтр (7) буде вже нелінійним і його реакція відображена на рис. 1, в. Із рисунка видно, що для прийнятої моделі коливання Гібса та низькочастотні шуми придушені майже повністю.

На рис. 1, г, приведений результат операції підвищення розділення (7), коли у модель додана похибка виконання операції усунення фону. У цьому випадку коливання і шуми пригнічуються не повністю, що і говорить про важливість останньої операції. Причому похибка може бути як позитивною (як на рис. 1) – недокомпенсація фону, так і від'ємною – перекомпенсація.

Задача виявлення окремих сигналів суттєво залежить від їх характеристик і параметрів, таких як форма, динамічний діапазон амплітуд піків сигналу, локальна й середня інтенсивності піків, характеристик шумів, а також від локального і фоновому (у всьому спектрі) вимірювання цих характеристик. Вибір способу рішення цієї задачі дуже сильно залежить від виду зондувального сигналу РЛС – простого радіоімпульсу або складноманіпульованого. Саме останній вид є найбільш перспективним до застосування, але має складну спектральну структуру з великим динамічним діапазоном амплітуд піків.

Першою й основною операцією задачі виявлення сигналів є відділення областей спектру, які містять основні спектральні піки сигналу, від інших областей, які, як правило, заповнені шумами і бічними пелюстками спектру сигналу. Ця операція є бінарною, пороговою, інакше кажучи, нелінійною. Причому, оскільки характеристики сигналу зміню-

ються за шкалою спектра, мова йде не про знаходження якогось одного порогу, а про визначення порогової лінії. На рис. 2, а, крива $|S_v|$ – це абсолютна величина S_v (7), яка приведена на рис. 1, г. Якщо середня фонові довжина, яку за віссю абсцис займає основний пік сигналу S_v , менше половини загальної довжини спектра, то фоновий рівень шумів може бути розрахований за допомогою медіанного фільтра з шириною вікна в два рази більшою довжини максимальної пачки піків. Тоді фонові складова порогової кривої Th буде

$$Th_f(t) = med_Filtr(|S_v|, W_{mf}) \cdot K_f, \quad (8)$$

де W_{mf} – вікно фільтра;

K_f – коефіцієнт пропорційності в межах 3–5.

Рис. 2. Виявлення спектральних піків

$|S_v|$ – абсолютна величина реакції фільтра Вінера S_v ; Th_f – фонові складова порогової кривої (8); Th_1 – “гаусова” локальна складова (9) порогової кривої; S_{vh} – результат порогової обробки сигналу $|S_v|$; S_{vhd} – результат застосування до S_{vh} операції подвійного диференціювання

Джерело: [5; 14, С. 78].

Далі розглядається задача усунення так званих “сателітних” піків, природа яких пояснюється двома факторами: 1) наявністю перших бічних пелюсток спектру сигналу на виході узгодженого фільтра і 2) при деконволюції сигналу такі “сателітні” піки можуть з’являтися при недостатньому придушенні коливальних Гібса. В якості “сателітного” в розглянутій моделі введений третій пік другої пачки.

Для придушення сателітних піків у порогову криву можна ввести локальну складову. Вона буде обраховуватись як реакція на сигнал S_v гаусового згладжуючого фільтра з шириною ядра, рівній, наприклад, подвійній ширині шуканих “істинних” пі-

ків, які відповідають апаратній функції, тобто:

$$Th_1(t) = gauss_Filtr(|S_v|, W_{gf}) \cdot K_1, \quad (9)$$

буде локальною складовою, де W_{gf} – ширина ядра фільтра;

K_1 – коефіцієнт, який дорівнює 0.5 – 2.0.

У такому випадку порогова крива (рис. 2, а) визначається як

$$Th(t) = \begin{cases} Th_f(t) \geq Th_1(t): & Th_f(t); \\ Th_f(t) < Th_1(t): & Th_1(t). \end{cases} \quad (10)$$

Результат порогової обробки (рис. 2, б) сигналу $S_v(t)$ буде визначатися як

$$S_{vh}(t) = \begin{cases} |S_v(t)| - Th(t) \geq 0: & |S_v(t)| - Th(t); \\ |S_v(t)| - Th(t) < 0: & 0. \end{cases} \quad (11)$$

Як видно із рис. 2, б, за рахунок введення локального порогу (для виразу (9) $K_1 = 1.2$), сателітний пік виявляється придушеним, і, крім того, повністю розрізнені піки першої пачки. Отриманий сигнал $S_{vh}(t)$ практично повністю очищений від шумів – високочастотні шуми придушені фільтром Вінера, низькочастотні шуми відсічені пороговою обробкою. Досягнутий результат дозволяє ще додатково підвищити розрізнення при рішенні задачі виявлення піків за допомогою простої, але достатньо ефективної, водночас чутливої до шумів операції – подвійного диференціювання.

На рис. 1, в, представлена інвертована друга похідна $S_{vhd}(t)$ від сигналу $S_{vh}(t)$. Як видно із рис. 2, усі корисні піки моделі спектра виявлені і розрізнені. Апаратурою виявлення приймального тракту РЛС положення основного піка на спектральній шкалі визначається як положення максимального значення сигналу $S_{vhd}(t)$ у відповідній області, де $S_{vhd}(t)$ перевищує нуль на доволіно малий поріг. В роботі [14] для визначення міри розділення введено позначення

$$R_s = \delta / W, \quad (12)$$

де δ – відстань між сусідніми піками;

W – ширина піків.

За величину R_s приймається мінімально помітна відносна відстань між піками. Класичний метод визначення розділення – максимум правдоподібності – не передбачає рішення інтегрального рівняння (1), і не використовує процедуру підвищення розділення, а за граничне розрізнення приймається $\delta = W$, або $R_s = 1$. Це фактично відповідає візуальному розділенню функцій $s(y)$ при “ручному” способі виявлення цілей по екрану монохромного індикатора. Також для випадку використання широкосмугових

сигналів зі значним діапазоном амплітуд, накладенні ефекту Гібса, підсиленні низькочастотних шумів, з'являються додаткові складнощі у визначенні порогової лінії виявлення корисних сигналів. Відомо [10; 13], що міра розділення суттєво залежить від рівня шумів і форми апаратної функції. Тому для перевірки можливості застосування розглянутих матеріалів для виявлення і розділення широкосмугових складноманіпульованих сигналів використана модель у вигляді аддитивної суміші пачки із двох детермінованих лінійно-частотноманіпульованих сигналів шириною 100 од. із гаусовим стаціонарним шумом із співвідношенням сигнал/шум = 45 дБ. Кожен окремий сигнал S'_r є результатом узгодженої фільтрації ехо-сигнала у приймальному тракті РЛС і має форму, приведену на рис. 3. Відстань між сигналами обрана такою ж – 35 од. Параметр регуляризації для обраних параметрів моделі обраний $\lambda = 2.5 \cdot 10^{-8}$.

Рис. 3. Результат узгодженої фільтрації ехо-сигнала у приймальному тракті РЛС
Джерело: розроблено авторами за даними [1, С. 263].

Результати роботи розглянутого способу для обраної моделі сигнально-шумової обстановки приведені на рис. 4, рис. 5. На рис. 4, а – результат операції (6), на рис. 4, б – відповідно (7). Позначення на рис. 4, рис. 5 відповідають позначенням рис. 1 і рис. 2.

Рис. 4. Результати роботи розглянутого способу для обраної моделі сигнально-шумової обстановки
Джерело: розроблено авторами за даними [14, С. 8].

Із аналізу отриманих результатів видно, що у результаті деконволюції вхідного сигналу S_r за “фільтром Вінера” (3), при мінімальному значенні параметра регуляризації λ (5), значно зростають низькочастотні шуми (рис. 3, а).

Вони майже повністю придушуються операцією (7) – перемноження виходу фільтра на вхідний сигнал (рис. 4, б).

У результаті порогової обробки (11) і подвійного диференціювання сигнали повністю розділяються (рис. 5, в, г).

Рис. 5. Розділені сигнали
Джерело: розроблено авторами за даними [14, С. 8].

Висновки

Розглянутий в статті спосіб виявлення і розділення сигналів майже у 2,5 рази має родільну здатність вищою за метод максимуму правдоподібності, а у математичному відношенні значно простіший, і для виконання потребує машинного часу незрівнянно менше.

Оскільки виявлення відбувається за піком спектру, також можна говорити і про деяке підвищення точності виміру доплерівської частоти сигналу.

Оцінювання впливу точності виміру на якість доплерівської селекції буде проведена у подальшому. Особливої уваги такий спосіб заслуговує у випадку застосування його для виявлення і розділення широкосмугових складноманіпульованих сигналів на виході узгодженого фільтра з їх значними “сателітними” першими бічними пелюстками спектра.

Саме пригнічення таких “сателітних” пелюсток відіграє свою роль у недопущенні факту “виявлення сигналу” сусідніми доплерівськими фільтрами.

Список літератури

1. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – М.: Советское радио, 1975. – С. 278-319.
2. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
3. Василенко Г.И. Теория восстановления сигналов / Г.И. Василенко // М.: Советское радио, 1979. – 272 с.
4. Обнаружение, разделение и оценка параметров масс-спектрометрических пиков методом свертки экспериментальных данных с производными гауссовых функций / С.И. Сирвидас, И.В. Заруцкий, А.М. Ларионов, В.В. Манойлов // Научное приборостроение. – 1999. – № 2(9). – С. 71-75.
5. Оцінювання частоти сигналів з надрозділенням на основі використання методу SSA та структурних властивостей кореляційної матриці / В.І. Василюшин, В.В. Лютов, І.В. Хуторна, М.І. Новіков // Системи обробки інформації. – 2018. – № 3(154). – С. 7-11.
6. Vasylyshyn V. Spectral analysis of signals by root-min-norm method, using modified SSA method / V. Vasylyshyn // Information Processing Systems. – 2018. – № 1(152). – P. 16-19.
7. Павлій В.О. Методи сліпої деконволюції оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазування / В.О. Павлій // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 3(204). – С. 108-111.
8. Hopgood J. Bayesian single channel blind deconvolution using parametric signal and channel model / J. Hopgood, P.J.W. Rayner // IEEE Workshop ASPAA. – New York, 1999. – P. 151-154.
9. Костенко П.Ю. Розділення-виявлення хаотичних зондувальних сигналів / П.Ю. Костенко, В.В. Тарнополова, Д.О. Какава // Системи обробки інформації. – 2019. – № 1(156). – С. 7-14. <https://doi.org/10.30748/soi.2019.156.01>.
10. Бондаренко Б.Ф. Теорія радіолокаційних систем / Б.Ф. Бондаренко, В.В. Вишнівський, В.П. Долгушин та ін. – К.: Київський університет, 2011. – 248 с.
11. К вопросу о измерении доплеровской частоты сигнала отраженного от цели лоцируемой за пределами радиогоризонта над морем / В.Д. Карлов, А.П. Кондратенко, А.К. Шейгас, Ю.Б. Ситник // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 1(14). – С. 115-117.
12. Evaluation of the accuracy of measuring the radial velocity of a target with an exponential and alternating decrease in phase correlation of the burst radio signal / V. Karlov, O. Kuznietsov, A. Artemenko, A. Karlov // Сучасні інформаційні системи. – 2019. – № 1. – С. 71-75.
13. Минервин Н.Н. Мера угловой разрешающей способности и точность измерения угла прихода волны при наличии случайных искажений ее фронта и аддитивного шума / Н.Н. Минервин, К.С. Васюта // Прикладная радиоэлектроника. – 2013. – № 4(12). – С. 484-486.
14. Бардин Б.В. Способ деконволюции спектрометрической информации и обнаружения спектральных пиков / Б.В. Бардин // Научное приборостроение. – 2017. – № 2(27). – С. 75-82.
15. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов. Практический подход / Э. Айфичер, Б. Джервис. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. – 992 с.
16. Корж Ю.Н. Эффективность нерекурсивных фильтров предсказания для нестационарных случайных процессов / Ю.Н. Корж, А.И. Тыртышников, С.В. Сомов. – 2017. – № 2(148). – С. 95-99.

Надійшла до редколегії 29.03.2021

Схвалена до друку 12.05.2021

Відомості про авторів:

Яровий Сергій Володимирович

кандидат технічних наук
старший викладач
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6138-5774>

Кузнєцов Олександр Леонідович

кандидат технічних наук доцент
доцент
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6138-5774>

Information about the authors:

Serhii Yarovyi

Candidate of Technical Science
Senior Instructor
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6138-5774>

Oleksandr Kuznietsov

Candidate of Technical Science Associate Professor
Senior Lecturer
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5915-8107>

ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРИ СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

С.В. Яровой, А.Л. Кузнєцов

Рассматривается задача повышения эффективности спектрального анализа радиолокационных сигналов на фоне шума за счет повышения разрешающей способности. В основу положена классическая операция деконволюции спектра

сигнала, которая выполняется с использованием фильтра Винера. Обнаружение отдельных сигналов осуществляется сравнением с адаптивным порогом, который формируется с учетом фоновой составляющей для разделения сигнала и шума, и локальной составляющей для подавления мешающих спутниковых пиков сигнала, обусловленных обработкой сигналов в приемном тракте радиолокационной станции. Для повышения разрешающей способности применена нелинейная операция дифференцирования результата пороговой обработки.

Ключевые слова: нелинейная деконволюция, разрешающая способность, фильтр Винера.

IMPROVEMENT OF RESOLUTION IN SPECTRAL ANALYSIS OF RADAR SIGNALS

S. Yarovyi, O. Kuznietsov

The location of air objects in the ultra-high frequency range of radio waves is associated with a significant distortion of the shape and, consequently, the spectrum of radio signals. The problem of increasing the efficiency of spectral analysis of radar signals against the background of noise by improving the resolution is solved. The analysis of linear and nonlinear methods of deconvolution is carried out, the conditions of their application are defined. It is based on the classical operation of signal spectrum deconvolution, which is performed using a Wiener filter. Measures of suppression of parasitic low-frequency Gibbs oscillations are applied. Detection of individual signals is carried out by comparison with the adaptive threshold, which is formed by taking into account the background component for signal and noise separation, and the local component for removing interfering satellite signal peaks caused by signal processing in the receiving path of the radar station. The formation of the background component of the threshold is performed using the median filter procedure, the local component is calculated as a reaction to the echo signal spectrum of the Gaussian smoothing filter with the selected core width. A nonlinear operation of differentiation of the threshold processing result is used to increase the resolution. In order to assess the quality of detection and separation operations in the selected way, a signal-noise model of a complex manipulated broadband signal is constructed. The possibility of suppressing its satellite petals as a result of coordinated filtration by the receiving path of the radar station was investigated. The application of the chosen method requires a much smaller amount of mathematical calculations and, consequently, less time to achieve the ultimate goal compared to the classical maximum likelihood method. The presented results of simulation modelling confirm the increase of detection efficiency and separation of useful signals at joint use of linear and nonlinear deconvolution methods. The application of the considered method of radar signal processing will affect the quality of Doppler filtering, the accuracy of measuring the radial velocity of targets.

Keywords: nonlinear deconvolution, resolution, spectral analysis, Wiener filter.