

УДК 621.391, 621.372

Н.П. Чернобородова<sup>1</sup>, М.П. Чернобородов<sup>2</sup>, А.С. Сіренко<sup>2</sup>, Т.І. Бугрова<sup>2</sup><sup>1</sup>ВАТ "Перетворювач", Запоріжжя<sup>2</sup>Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя

## ПОЛІПШЕННЯ ШВИДКІСНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЛС 35Д6

Проаналізовано причини виникнення втрат у швидкісній характеристиці (ШХ) радіолокаційної станції (РЛС) 35Д6. Виявлено неузгодженість періодів повторення імпульсів зондування з властивостями штатних вагових функцій, застосовуваних за обчислення дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Показано, що не існує вагового вікна, яке було б єдиним оптимальним для режимів випромінювання РЛС 35Д6 з однаковою кількістю імпульсів зондування. Виконано оптимізацію вікон ДПФ за критерієм мінімуму втрат у ШХ. Отримано, що шляхом заміни штатних вагових функцій на оптимальні, можливе зменшення втрат на 7% – 16% (в залежності від метеоумов). За цього, для кожного режиму випромінювання треба застосовувати окрему вагову функцію.

**Ключові слова:** ДПФ, АЧХ, вагове вікно, фільтр, швидкісна характеристика, втрати

### Вступ

**Постановка проблеми.** Для забезпечення захищеності від впливу як природних, так й штучно створених пасивних завад, у радіолокаційній станції (РЛС) 35Д6 селекція рухомих цілей здійснюється за допомоги пристрою стабілізації рівня хибних тривог за радіальною швидкістю руху об'єктів на основі цифрових фільтрів, втілених методом дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Такий спосіб формування зони режекції дозволяє отримувати її ширину більшу за  $F_n/2$  (де  $F_n$  – частота повторення імпульсів зондування), й істотно зменшити рівень втрат корисних сигналів порівняно до пристроїв черезперіодного віднімання (компенсації – ЧПВ, ЧПК) [1].

З метою мінімізації втрат у швидкісній характеристиці (ШХ) РЛС 35Д6 у [2] було виконано оптимізацію вагових функцій ДПФ. Отримано, що шляхом заміни штатних вагових функцій на оптимальні, у різних режимах роботи можливе зменшення втрат  $\Delta Z$  на 5...10% в умовах впливу пасивної завади (завжди поліпшення ШХ) й на -1...0,5% (від незначного погіршення до неістотного поліпшення ШХ) на тлі лише шумів. Проведені дослідження виявили неузгодженість періодів повторення імпульсів зондування з властивостями як штатних вагових функцій, так й запропонованих, які застосовуються за обчислення дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Ця неузгодженість полягає у поліпшенні у швидкісній характеристиці в одних метеоумовах й практично незмінності чи, навіть, невеликому збільшенні втрат в інших.

**Метою статті є:**

а) аналіз причин виникнення втрат у швидкісній характеристиці, обумовлених неузгодженістю властивостей застосованої вагової функції ДПФ й періодами випромінювання імпульсів зондування;

б) пошук шляхів подальшої оптимізації форми амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) фільтрів ДПФ за критерієм мінімуму втрат у швидкісній характеристиці РЛС 35Д6.

### Основний розділ

#### Аналіз причин виникнення втрат у швидкісній характеристиці РЛС 35Д6

У пристрої стабілізації рівня хибних тривог за радіальною швидкістю руху об'єктів здійснюється міжпачкова обробка сигналів з метою їх розділення на два класи [2]:

а) пасивні завади із швидкостями руху, що потрапляють до зони режекції РЛС;

б) цілі, що рухаються із швидкостями, які не потрапляють до зони режекції РЛС.

Така класифікація сигналів стає можливою завдяки вобуляції періодів повторення імпульсів зондування, що призводить до зміни фазового зсуву між випроміненим й прийнятим імпульсами зондування однієї частотної пачки стосовно іншої. Це, у свою чергу, призводить до зміни ширини смуги радіальних швидкостей руху цілей, що перекривається головною пелюсткою одного фільтра ДПФ. Таким чином, зміна періоду повторення призводить до зміни передаткового коефіцієнта АЧХ фільтра. Тобто, за вобуляції періоду опромінення об'єкта, що рухається з малою (близькою до нуля) радіальною швидкістю, на виході ДПФ для різних частотних пачок утворюються приблизно рівноамплітудні значення.

Застосування для різних періодів повторення імпульсів зондування однієї й тієї ж вагової функції, обумовлює змінність ширини смуги радіальних швидкостей руху цілей, що перекривається головною пелюсткою одного фільтра ДПФ. Тому виконана у [2] оптимізація шляхом компромісного підбирання властивостей однієї вагової функції ДПФ

для чотирьох періодів повторення не дозволила досягнути поліпшення швидкісної характеристики РЛС 35Д6 за роботи у різних метеоумовах.

Якісно іншим шляхом зменшення втрат швидкісної характеристики може стати підбирання для кожного періоду повторення окремого вагового вікна з метою оптимізації ширин їх смуг пропускання.

#### Оптимізація ширини смуги пропускання АЧХ фільтрів ДПФ за критерієм мінімуму втрат у швидкісній характеристиці РЛС 35Д6

**Умови проведення досліджень.** Дослідження проводилися із застосуванням комп'ютерної моделі власної первинної обробки РЛС 35Д6.

У [3] було запропоновано метод розрахунку вагових коефіцієнтів  $a_k$  шляхом розв'язання системи лінійних рівнянь (для отримання початкової крапки наближення  $a'_k$ ) й подальшого уточнення значень  $a_k$  за допомогою нетривалої одновимірної лінійної мінімізації шляхом підбирання підставки  $\Delta'$  для вікна  $a'_k$ :

$$a_k = a'_k + \Delta'. \quad (1)$$

Збільшенням  $\Delta'$  досягається звуження головної пелюстки АЧХ фільтра й зміна рівня бічних пелюсток.

Через намагання компромісним шляхом підібрати властивості однієї вагової функції ДПФ для усіх чотирьох періодів повторення одночасно, у [2] виконувалася однопараметрична оптимізація залежності функції втрат  $\Delta Z$  від параметрів вікна  $\Delta'$ :  $\Delta Z(\Delta')$ . Шляхом заміни штатних вагових функцій ДПФ на досліджувані, оцінювалася ступінь збільшення (розширення смуги режекції:  $\Delta Z(\Delta') > 0$ ) чи зменшення ( $\Delta Z(\Delta') < 0$ ) втрат (у відсотках) ШХ станції з тим чи іншим вікном відносно штатної вагової функції.

За підбирання для кожного з чотирьох періодів зондування окремого вікна з метою оптимізації

ширин їх смуг пропускання, досліджувана функція стає чотиривимірною й набуває такого вигляду:

$$\Delta Z(\Delta'_1, \Delta'_2, \Delta'_3, \Delta'_4), \quad (2)$$

де  $\Delta'_j$  визначає характеристики вагової функції для  $j$ -го періоду повторення імпульсів зондування ( $j=1, 2, 3, 4$ ).

Через складну форму чотирипараметричної функції (2), обумовлену наявністю багатьох локальних екстремумів, жодний з загально відомих методів багатовимірної оптимізації (Хука-Дживса, Нелдера-Міда [4], різновиди генетичного алгоритму [5], тощо) не дозволяв відшукати оптимального розв'язку. Тому задачу мінімізації втрат швидкісної характеристики було виконано методом перебору [4].

З метою пошуку оптимальних форм АЧХ фільтрів ДПФ мінімізувалася залежність (2) для вузькосмугової моделі цілі, що рухається на тлі шумів у вільному від пасивних завад просторі, й на тлі однієї пасивної завади (вузькосмугова модель).

**Кількісні показники.** У табл. 1 підбиті підсумки досліджень з оптимізації АЧХ фільтрів ДПФ з метою зменшення втрат у швидкісній характеристиці РЛС 35Д6. Аналогічно до отриманих у [2] підсумків, функція (2) набуває мінімального значення  $\Delta Z_{\min}$  за руху цілі на тлі шумів, але для цих же самих вікон ( $\Delta'_1, \Delta'_2, \Delta'_3, \Delta'_4$ ) вона не набуває мінімального значення в умовах впливу пасивних завад (варіант 1). І навпаки (варіант 2). За накладання додаткової умови не збільшення рівня хибних тривог й сталості ширини зони режекції, було знайдено компроміс  $\Delta Z_{\text{opt}}$ , який хоч і не дозволяє досягнути потенційно можливих характеристик (позначених у табл. 1 як  $\Delta Z_{\min}$ ), але забезпечує досягнення певного поліпшення швидкісної характеристики. За цього, для різних режимів випромінювання необхідно застосовувати окремий набір вагових функцій.

Таблиця 1

Рівень зменшення втрат у ШХ  $\Delta Z$ , %

Мінімізація втрат у ШХ за руху цілі на тлі:	Режим ви пром інюв ання				
	НР6	Р12	Р6	Ч12	Ч6
варіант 1					
шумів, $\Delta Z_{\min}$	-9	-7	-8	-15	-13
пасивної завади	-3	-1	-2	-1	-2
варіант 2					
шумів	-2	-1	-2	-11	-3
пасивної завади, $\Delta Z_{\min}$	-28	-27	-27	-17	-26
компроміс					
шумів, $\Delta Z_{\text{opt}}$	-7	-5	-6	-13	-8
пасивної завади, $\Delta Z_{\text{opt}}$	-15	-13	-14	-16	-15

Зважаючи на раніше отримані дані [2], можна дійти висновку про невідповідність застосованих у РЛС 35Д6 періодів повторення імпульсів зондування втіленому способу формування зони режекції.

Одержані підсумки обумовлюють необхідність розробки питання оптимізації періодів випромінювання імпульсів зондування для втіленого у РЛС 35Д6 способу формування зони режекції.

**Якісні показники.** В залежності від дальності й радіальної швидкості польоту цілі, а також її характеристик ефективної поверхні розсіювання, чутливості приймача РЛС й швидкості електромагнітного сканування, ціль може бути опроміненою імпульсами зондування  $M$  частотних пачок, а виявленою – лише у  $K$  частотних пачках. Відмітка від цілі на екрані РЛС 35Д6 з'являється лише за умови виконання критерію  $K$  з  $M$  за  $K=2..M$ ,  $M=4$ .

Для наочної ілюстрації проведених досліджень, на рис 1, а наведено швидкісну характеристику РЛС 35Д6 для малорозмірної цілі у режимі Ч12. За віссю ординат виведено кількість вико-

нань критерію  $K$  з  $M$  для випадку руху цілі з відповідною радіальною швидкістю руху  $v_p$  (швидкість відлічується за віссю абсцис). Нулі характеристики ( $K=0$ ) визначають діапазон значень  $v_p$ , за яких ціль виявлена бути не може. Зменшення числа виконань критерію до  $K=3$  чи  $K=2$  свідчить про зниження імовірності виявлення цілі. У зв'язку з цим, флуктуації амплітуди відбитого від цілі сигналу обумовлюють бажання завжди отримувати  $K=M=4$ .

Пунктирними лініями намальовано швидкісну характеристику для малорозмірної цілі, а суцільними – великорозмірної.

На рис. 1, б наведено підсумки робіт з мінімізації втрат швидкісної характеристики РЛС 35Д6 у режимі Ч12 шляхом заміни штатного вікна на оптимальні. Поліпшення характеристики у даному випадку полягає лише у зменшенні втрат (коли  $K$  набуває нульового значення), а й у розширенні смуги радіальних швидкостей для  $K=3$  (наприклад, за  $150 < v_p < 450$ ) чи  $K=4$  (наприклад, за  $450 < v_p < 750$ ).

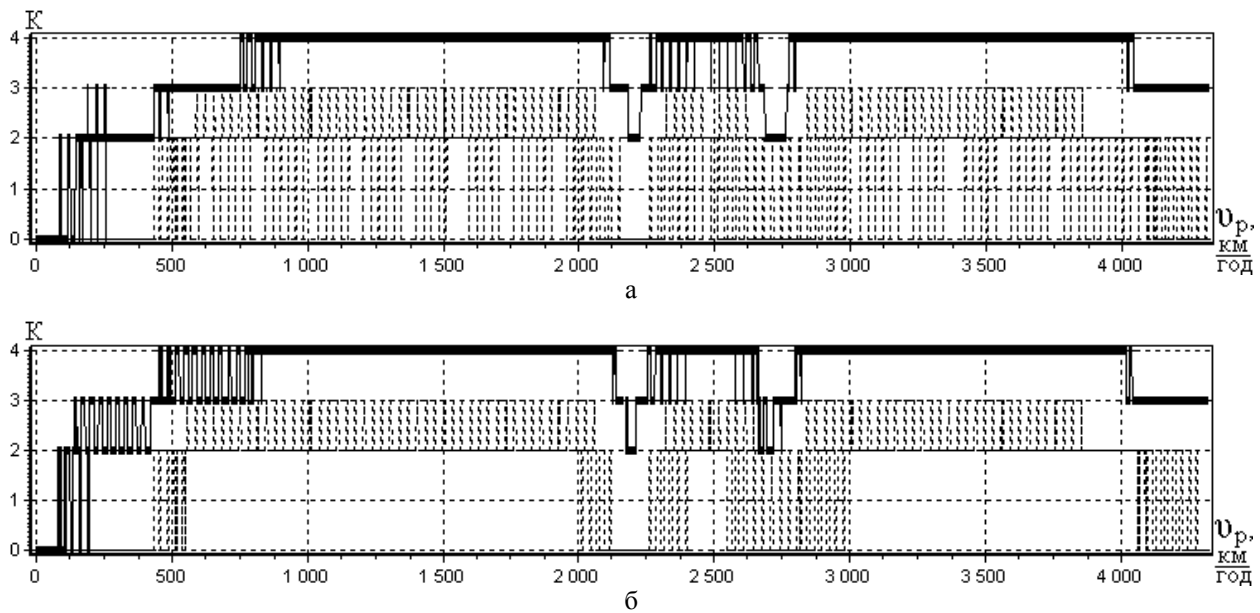


Рис. 1. Швидкісна характеристика РЛС 35Д6 для режиму Ч12:  
а – штатна; б – оптимізована

## Висновки

Проведені дослідження з оптимізації форми АЧХ фільтрів ДПФ за критерієм зменшення втрат у швидкісній характеристиці РЛС 35Д6 показали, що:

1. Головною причиною виникнення втрат є невідповідність застосованих періодів повторення імпульсів зондування втіленому способу формування зони режекції.

2. Не існує одного набору вікон, який був би єдиним оптимальним для усіх режимів випромінювання імпульсів зондування.

3. Шляхом заміни штатних вагових функцій на оптимальні можливе зменшення втрат на 13 – 16% в умовах впливу пасивних завад й 7 – 13% за їх відсутності. За цього, для різних режимів випромінювання необхідно застосовувати окрему вагову функцію.

4. Істотніше зменшення втрат може бути досягнуто лише шляхом оптимізації періодів випромінювання імпульсів зондування.

Оскільки питання оптимізації періодів зондування за критерієм зменшення втрат у швидкісній характеристиці є недослідженою науковою задачею, то проведення таких досліджень є нагальним.

**Список літератури**

1. Лаврентьев В.Н. Метод формирования полосы режекции скоростной характеристики радиолокационной системы селекции движущихся целей / В.Н. Лаврентьев, Д.М. Пиза // *Радиоэлектроника. Информатика. Управление*. – Запоріжжя: ЗНТУ, 1999. – № 2. – С. 22-26.

2. Чорнобородова Н.П. Поліпшення швидкісної характеристики РЛС 35Д6 / Н.П. Чорнобородова, М.П. Чорнобородов, А.С. Сиренко // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2011. – № 2(26). – С. 178-182.

3. Чорнобородова Н.П. Синтез вагових функцій з малим рівнем міжфільтрового просочування для дискретного перетворення Фур'є / Н.П. Чорнобородова, М.П. Чорнобородов // *Системи озброєння і військова техніка*. – Х.: ХУПС, 2008. – № 2. – С. 159-162.

4. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.

5. Олійник О.А. Еволюційні обчислення та програмування: навчальний посібник / О.А. Олійник, С.О. Субботін, О.О. Олійник. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. – 324 с.

Надійшла до редколегії 11.01.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

**УЛУЧШЕНИЕ СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЛС 35Д6**

Н.П. Чорнобородова, М.П. Чорнобородов, А.С. Сиренко, Т.И. Бугрова

*Проанализированы причины возникновения потерь в скоростной характеристике (СХ) радиолокационной станции (РЛС) РЛС 35Д6. Обнаружена несогласованность периодов повторения зондирующих импульсов со свойствами штатных весовых функций, применяемых при вычислении дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Показано, что не существует весового окна, которое было бы единым оптимальным для режимов излучения РЛС 35Д6 с одинаковым количеством зондирующих импульсов. Выполнена оптимизация формы окон ДПФ по критерию минимума потерь в СХ. Получено, что путём замены штатных весовых функций на оптимальные возможно снижение потерь на 7% – 16% (в зависимости от метеоусловий). При этом, для каждого режима излучения нужно использовать отдельную весовую функцию.*

**Ключевые слова:** ДПФ, АЧХ, весовое окно, фильтр, скоростная характеристика, потери.

**RADAR 35D6 SPEED CHARACTERISTIC IMPROVING**

N.P. Chornoborodova, M.P. Chornoborodov, A.S. Sirenko, T.I. Bugrova

*The origin reasons of losses in the radar 35D6 speed characteristic (SC) are analyzed. Inconsistency of the pulses repetition periods with properties of the 35D6 original weighting functions applied at digital Fourier transform (FFT) computing is detected. It is shown, that there is no weighting window which would be common and optimal for pulse transmit regimes of radar 35D6 with equal quantity of pulses. FFT window form optimization by criterion of a SC losses minimum is making. It is gained; that by replacement of 35D6 original weighting functions by the optimal decrease of losses to 7% – 16% is possible (depending on the meteorological situation). Thus, for each pulse transmit regime it is necessary to use a separate weighting function.*

**Keywords:** Discrete Fourier transform, weighting function, filter, speed characteristic, losses.