УДК: 621.762:621.396.96 DOI: **10.33099/2311-7249/2025-53-2-101-108**

НЕВМЕРЖИЦЬКИЙ Ігор Михайлович,
кандидат технічних наук, доцент,
Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна,
https://orcid.org/0000-0002-5499-6785

КОЛЕСНІК Олександр Миколайович,
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна,
https://orcid.org/0000-0002-8213-017X

КОСТИРЯ Олександр Олексійович,
доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна,
https://orcid.org/0000-0003-3363-2015

ВІЗУАЛЬНО-ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АЛГОРИТМІВ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ КОМБІНОВАНИХ ЕХОСИГНАЛІВ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ РАДІОТЕХНІЧНИХ ВІЙСЬК

Стаття присвячена опису загальних принципів візуально-імітаційного моделювання алгоритмів цифрової обробки комбінованих ехосигналів радіолокаційних станцій радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України за допомогою пакета програм Simulink системи MATLAB. ***Мета статті****. Показати можливість практичного використання пакета програм Simulink, для створення візуально-імітаційних моделей алгоритмів цифрової обробки комбінованих ехосигналів у сучасних вітчизняних оглядових радіолокаційних станціях радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України. Надати рекомендації науковцям та суб'єктам освітнього процесу технічних університетів, що займаються дослідженнями алгоритмів цифрової обробки складних радіолокаційних сигналів щодо застосування розроблених Simulink-моделей алгоритмів цифрової обробки для дослідження оцінки їх ефективності та пошуку шляхів з удосконалення, а також у якості візуальних дидактичних засобів навчання.*

Методи дослідження. *Під час проведення дослідження застосовано основні принципи системного підходу – структурний та функціональний аналіз об'єкта моделювання, візуально-імітаційне Simulink-моделювання з подальшим проведенням імітаційного експерименту.*

Отримані результати дослідження. *Наведено опис загальних принципів створення візуально-імітаційної Simulink-моделі алгоритму цифрової обробки комбінованого ехосигналу сучасної вітчизняної оглядової радіолокаційної станції метрового діапазону хвиль «Малахіт», яка знаходиться на озброєнні підрозділів радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України. Створено Simulink-модель 4-х точкового фільтра ковзного середнього, який є оптимальним для цифрової фільтрації простого «гладкого» ехосигналу, а також Simulink-модель 155-точкового стискального фільтра, який є оптимальним для фільтрації складного широкосмугового ехосигналу з лінійною частотною модуляцією. Правильність результатів роботи Simulink-моделей перевірена в ході проведення імітаційного експерименту. Результати експерименту подані за допомогою осцилограм та графіків пакета Simulink. Наведені результати експерименту підтверджують працездатність Simulink-моделей алгоритмів цифрової обробки комбінованих ехосигналів та не суперечать вже відомим результатам.*

Елементи наукової новизни. *Наукова новизна проведених досліджень зводиться до застосування принципів (методів) візуально-імітаційного моделювання для створення Simulink-моделей алгоритмів цифрової обробки комбінованих ехосигналів у сучасних вітчизняних оглядових радіолокаційних станціях радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України.*

Теоретична й практична значущість викладеного у статті. *Використання візуально-імітаційного Simulink-моделювання дає змогу вирішити питання щодо проведення досліджень ефективності існуючих алгоритмів цифрової обробки комбінованих ехосигналів та забезпечити пошук нових більш ефективних алгоритмів обробки, за мінімальних витрат часу, коштів і ресурсу засобів радіолокації. Також рекомендовано застосування Simulink-моделей в освітньому процесі технічних університетів, що займаються дослідженнями алгоритмів цифрової обробки складних радіолокаційних сигналів, як електронних візуальних дидактичних засобів навчання.*

© І. М. Невмержицький, О. М. Колеснік, О. О. Костиря
This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Ключові слова: *візуально-імітаційне моделювання, Simulink-модель, радіолокаційна станція, алгоритм цифрової обробки, комбінований ехосигнал.*

Вступ

Постановка проблеми. На сьогодні в радіотехнічних військах (далі – РТВ) Повітряних Сил Збройних Сил України (далі – ПС ЗС України), поряд з оглядовими радіолокаційними станціями (далі – РЛС) старого парку метрового діапазону хвиль такими, як П-18 «Терек» (розробка ВАТ «НІТЕЛ» (ОАО «НИТЕЛ»)), прийнята на озброєння у 1971 році), почали широко застосовуватися модернізовані версії цієї РЛС – РЛС «Малахіт» (розробка ПАТ «Холдингова компанія "Укрспецтехніка"», Україна) [1] та РЛС П-18МА (розробка науково-виробничого підприємства «Аеротехніка-МЛТ», Україна) [2]. Дані модернізовані РЛС зарекомендували себе за час російсько-української війни як надійні джерела для отримання розвідувальної радіолокаційної інформації про повітряну обстановку. Основна особливість цих РЛС – застосовування в них передавачів на твердотільних високочастотних транзисторах із можливістю цифрового формування комбінації зондувальних сигналів різних форматів.

Так, для РЛС «Малахіт» це комбінація простого «гладкого» амплітудно модульованого сигналу (далі – АМ-сигналу) та складного широкосмугового сигналу з лінійною частотною модуляцією (далі – ЛЧМ-сигналу), а для РЛС П-18МА – простого «гладкого» імпульсу (далі – ГІ) та складного широкосмугового сигналу з фазовою маніпуляцією (далі – ФМ-сигналу) [3].

Для кожної з вище вказаних РЛС передбачена цифрова обробка комбінованих ехосигналів, яка дає змогу, значною мірою, відповідати сучасним вимогам щодо точності, обсягу й достовірності радіолокаційної інформації. Так, для прикладу, в РЛС «Малахіт» під час цифрової обробки складного широкосмугового ЛЧМ-ехосигналу з'являється можливість забезпечити одночасно потрібне розділення цілей за дальністю і швидкістю, що неможливо у процесі використання тільки простого «гладкого» АМ-ехосигналу. Однак, під час такої обробки (стиснення) складних широкосмугових ЛЧМ-ехосигналів, з'являються бічні пелюстки (далі – БП) стисненого сигналу, які ускладнюють виявлення і розділення ехосигналів від близько розташованих у просторі повітряних об'єктів, особливо, якщо такі об'єкти мають різну ефективну площу розсіювання (далі – ЕПР). Ускладнення зводиться до того, що БП стисненого ЛЧМ-ехосигналу від цілі з більшою ЕПР можуть «маскувати» головну пелюстку відгуку стисненого ЛЧМ-ехосигналу від цілі з малою ЕПР, наприклад безпілотного літального апарата (далі – БпЛА). Як наслідок, можуть спостерігатися пропуски виявлення відміток цілей з малою ЕПР, які знаходяться на незначних відстанях від цілі з великою ЕПР. Крім цього, якщо за результатами цифрової обробки стиснений широкосмуговий ЛЧМ-ехосигнал має суттєвий рівень БП, це може спричинити хибні перевищення порогу виявлення і, як наслідок, за результатами первинної цифрової обробки будуть з'являтися хибні відмітки від цілей та у подальшому хибні зав'язування трас цілей.

Враховуючи вищезазначене актуальним на сьогодні залишається завдання щодо пошуку способів зменшення рівня БП стисненого широкосмугового ЛЧМ-ехосигналу за рахунок вибору параметрів складних зондувальних сигналів, а також розробки та пошуку алгоритмів цифрової обробки ЛЧМ-ехосигналів, що гарантують заданий низький рівень БП автокореляційної функції (далі – АКФ) прийнятих ЛЧМ-ехосигналів.

Здійснювати розробку та дослідження ефективності алгоритмів цифрової обробки комбінованих ехосигналів неможливо на сьогодні без використання сучасного математичного програмного забезпечення. Так, серед інженерів і науковців, які займаються проєктуванням систем цифрової обробки сигналів (далі – ЦОС) та інших додатків моделювання, особливої уваги займає програмне забезпечення Simulink, що є одним з компонентів (додатків) зі складу сімейства програмних продуктів системи MATLAB, яке розроблене компанією The MathWorks [4; 5]. У середовищі MATLAB/Simulink є можливість здійснювати моделювання, імітацію та аналіз дискретних, безперервних, а також гібридних систем. За допомогою додатка Simulink з'являється можливість реалізувати принцип візуально-імітаційного моделювання, коли розробник з бібліотеки стандартних блоків даного додатка, на екрані комп'ютера, створює модель процесу (алгоритму поведінки системи), у реальному масштабі часу здійснює зміну вхідних параметрів моделювання, проводить відповідні розрахунки та обчислення, з візуальним відображенням результатів імітаційного моделювання. Такий підхід суттєво відрізняється від класичного способу моделювання і не вимагає від розробника досконалого знання мови програмування та числових методів математики. Крім цього, пакет Simulink це самостійний інструмент для розробки і для створення в ньому візуально-імітаційних моделей і тому не потрібно знати сам MATLAB та інші його додатки. Ця перевага робить Simulink найкращим та найпопулярнішим інструментом для проведення візуально-імітаційного моделювання алгоритмів цифрової обробки комбінованих ехосигналів РЛС РТВ ПС ЗС України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальні принципи моделювання елементів систем озброєння РТВ засобами візуально-імітаційного моделювання Simulink наведені в [6], де запропоновано алгоритм процесу моделювання елементів систем озброєння РТВ та наведено приклад

створення візуально-імітаційної моделі квадратурного автокомпенсатора активних шумових завад РЛС РТВ. В [7; 8] наведено загальні принципи проєктування візуально-імітаційних Simulink-додатків, що моделюють алгоритми селекції рухомих цілей (далі – СРЦ) на основі однократної та двократної черезперіодної компенсації пасивних завад, дискретного перетворення Фур'є та Хартлі, цифрових фільтрів, а також адаптивних алгоритмів захисту РЛС РТВ від активних шумових завад.

Разом із тим, поза увагою залишилися питання візуально-імітаційного Simulink-моделювання алгоритмів цифрової обробки комбінованих ехосигналів у РЛС РТВ ПС ЗС України.

Мета статті. Показати можливість практичного використання пакета програм Simulink, для створення візуально-імітаційних моделей алгоритмів цифрової обробки комбінованих ехосигналів в сучасних вітчизняних оглядових РЛС РТВ ПС ЗС України. Надати рекомендації науковцям і суб'єктам освітнього процесу технічних університетів, що займаються дослідженнями алгоритмів цифрової обробки складних радіолокаційних сигналів, щодо застосування розроблених Simulink-моделей алгоритмів цифрової обробки для дослідження оцінки їх ефективності та пошуку шляхів з удосконалення, а також у якості електронних візуальних дидактичних засобів навчання.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для прикладу, в цій статті, візуально-імітаційне моделювання алгоритмів цифрової обробки комбінованих ехосигналів здійснюється для РЛС метрового діапазону хвиль «Малахіт». У процесі створення візуально-імітаційних Simulink-моделей використовувався алгоритм процесу моделювання елементів систем озброєння РТВ, що наведений в [6]. Цей алгоритм наочно відображає основні загальні етапи процесу візуально-імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink, які за необхідності можна розширити залежно від складності об'єкта дослідження.

Дотримуючись даного алгоритму, на першому етапі, було проведено декомпозицію, тобто розбиття складної системи на підсистеми. Враховуючи те, що алгоритм обробки комбінованого ехосигналу в РЛС «Малахіт» – це складний алгоритм, що являє собою сукупність взаємопов'язаних між собою часткових алгоритмів – алгоритм обробки простого «гладкого» АМ-ехосигналу та алгоритм обробки складного широкосмугового ЛЧМ-ехосигналу, застосовуючи принцип декомпозиції, потрібно для кожного алгоритму обробки створити свою часткову візуально-імітаційну Simulink-модель.

Необхідну змістовну інформацію про алгоритми цифрової обробки комбінованих ехосигналів в РЛС «Малахіт» отримано з аналізу її змістовної (концептуальної) моделі, яка створюється (згідно алгоритму [6]) на етапі проведення структурного та функціонального аналізу об'єкта моделювання. Ця модель детально розкриває (описує) сутність кожного з часткових алгоритмів цифрової обробки, що реалізовані в РЛС «Малахіт». Враховуючи обмеження на зміст, дана концептуальна (змістовна) модель у даній статті не наводиться.

Перед тим як приступити до створення часткових візуально-імітаційних Simulink-моделей алгоритмів цифрової обробки комбінованих ехосигналів в РЛС «Малахіт», необхідно створити часткові Simulink-моделі імітатора простого «гладкого» АМ-ехосигналу та імітатора складного широкосмугового ЛЧМ-ехосигналу.

Спочатку побудуємо Simulink-модель імітатора простого «гладкого» АМ-ехосигналу. Для цього необхідно запустити систему MATLAB та завантажити пакет Simulink. Після створення нової (порожньої) моделі в середовищі Simulink потрібно задати параметри моделювання. Для нашої моделі параметри моделювання наступні: час моделювання Start time: 0, Stop time: 124e-6; метод (крок) моделювання Type: Fixed-step (фіксований крок); тип обчислювача Solver: discrete (no continuos states) (дискретний); розмір фіксованого кроку (фундаментальний час вибірки) Fixed-step size: (1/20e6).

Параметри моделювання для даної Simulink-моделі задані з урахуванням того, що в системі ЦОС РЛС "Малахіт" дискретизація ехосигналів відбувається з частотою Fд = 20 МГц (період дискретизації становить $1/F$д = 0,05 мкс). Отже, після аналого-цифрового перетворення (далі – АЦП) одна дискрета за дальністю становить 7,5 м. Під час подальшої обробки, після проведеної децимації з коефіцієнтом 16, переходять на величину дискрета 120 м (за часом це 0,8 мкс).

Після налаштування параметрів моделювання можна безпосередньо приступати до створення Simulink-моделі. Для створення Simulink-моделі дискретного АМ-ехосигналу використовуватимемо аналітичний вираз (1), що описує комплексну амплітуду $\dot{U}(t)$, яка його огинає:

$$two\dot{U}(t) = U_m \cdot \exp\left[2 \cdot \pi \cdot (f_н \cdot t) + fi_o\right], \qquad (1)$$

де U_m – амплітуда сигналу;

$f_н$ – частота-носій;

t – поточний час;

fi_o – початкова фаза сигналу.

Створена Simulink-модель імітатора дискретного АМ-ехосигналу та імітований дискретний АМ-ехосигнал на тлі внутрішніх шумів та імпульсних завад (далі – ІЗ) показані на рис. 1.

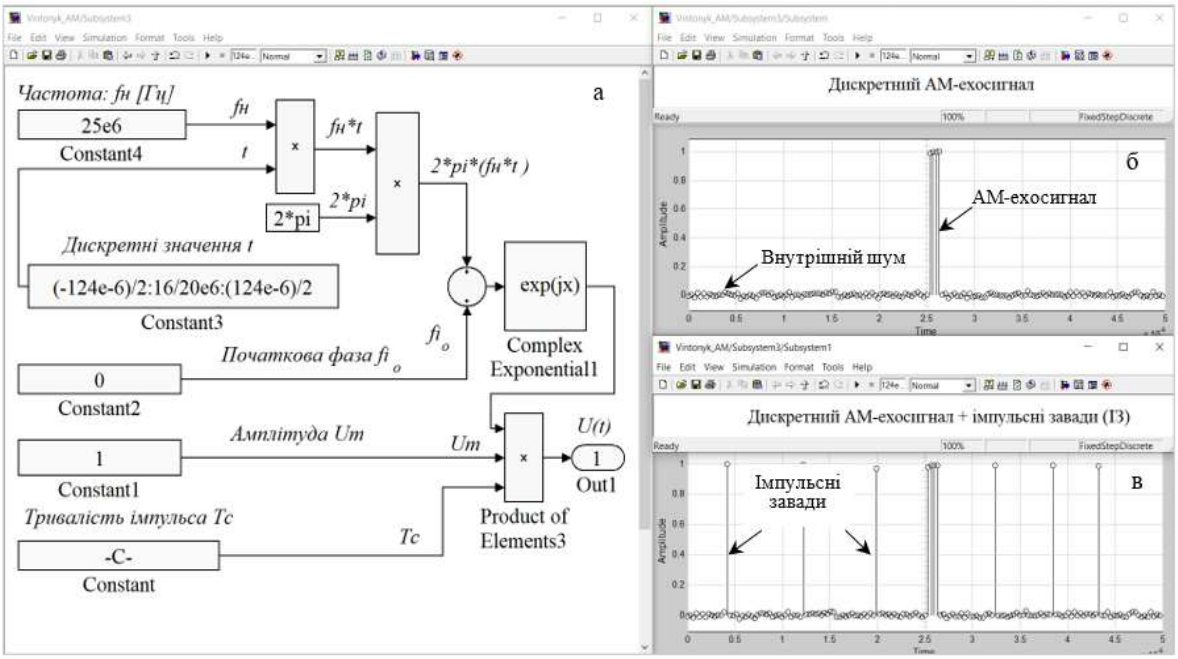

Рисунок 1 – Імітатор дискретного АМ-ехосигналу [Розроблено авторами]:
а – Simulink-модель імітатора дискретного АМ-ехосигналу; б – імітований дискретний АМ-ехосигнал на тлі внутрішніх шумів; в – імітований дискретний АМ-ехосигнал на тлі внутрішніх шумів та імпульсних завад

Як видно з рис. 1, а для побудови Simulink-моделі імітатора дискретного АМ-ехосигналу використовуються стандартні елементи блоків із бібліотеки блоків Simulink [4; 5]. Це: Constant – виводить константу, визначену параметром «Значення постійної»; Complex Exponential – обчислює комплексну експоненціальну функцію реальних вхідних даних через формулу Ейлера; Product of Elements – множення або розділення вхідних даних; Out – надає вихідний порт для підсистеми або моделі.

Результат імітації дискретного АМ-ехосигналу на тлі внутрішніх шумів та ІЗ подано за допомогою компонента Vector Scope (осцилограф) бібліотеки блоків DSP System Toolbox пакета Simulink (рис. 1, б, в). Компонент Vector Scope призначений для відображення вектора або матриці даних у часовій або частотній площині, або визначених користувачем даних [4; 5].

У процесі створення Simulink-моделі враховано те, що модель має імітувати дискретний АМ-ехосигнал на виході цифрового фазового детектора, який формує дві квадратурні складові ехосигналу $\dot{U}(t)$ з дискретністю за дальністю 120 м, що за часом дорівнює 0,8 мкс. Передбачено також створення дискретних ехосигналів різної тривалості (від 1-го до 4-х дискрет та більше) та різної затримки (дискретність затримки становить 0,8 мкс). Для імітації внутрішніх шумів використовується генератор шумів блок Random Source, який генерує випадковий сигнал із рівномірним або гаусовим (нормальним) розподілом [4; 5] (на рис. 1, а даний блок не наведено).

Використовуючи аналогічний підхід було створено Simulink-модель імітатора складного широкосмугового ЛЧМ-ехосигналу для РЛС "Малахіт" (рис. 2, а). Імітований дискретний ЛЧМ-ехосигнал, а також його амплітудно-частотний спектр (далі – АЧС) та фазочастотний спектр (далі – ФЧС) наведено на рис. 2, б, в, г.

Для аналітичного опису ЛЧМ-ехосигналу використовувалася його математична модель (2), яка наведена в [9]:

$$\dot{U}(t) = U_m \cdot \exp\left[2 \cdot \pi \cdot \left(f_н \cdot t + \frac{b \cdot t^2}{2}\right) + fi_o\right], \quad (2)$$

де $f_н = (F_{max} + F_{min})/2$ – центральне значення частоти-носія;

$b = (F_{max} - F_{min})/T_c$;

T_c – тривалість сигналу;

F_{max}, F_{min} – максимальне і мінімальне значення частоти радіосигналу;

t – поточний час

(змінюється у межах: $-\frac{T_c}{2} \le t \le \frac{T_c}{2}$).

Враховуючи те, що тривалість ЛЧМ-ехосигналу для РЛС П-18 «Малахіт» становить $T_c = 124$ мкс [3], а тривалість одного дискрету за часом 0,8 мкс, маємо 124 мкс/0,8 мкс = 155 дискрет, тобто імітований ЛЧМ-ехосигнал на виході схеми імітатора містить 155 дискрет (рис. 2, б). Децимація сигналу після дискретизації здійснюється у блоці Constant, задаванням параметру Constant value значення: (-124e-6)/2:16/20e6:(124e-6)/2. Особливість даної моделі – додатково з'являється блок Slider Gain (рис. 2, а), що відповідає за розрахунок девіації частоти dF імітованого дискретного ЛЧМ-ехосигналу. Блок Slider Gain забезпечує плавну зміну (за допомогою вбудованого повзунка) у реальному масштабі часу (тобто під час моделювання) скалярного значення девіації частоти від 0 до 440 кГц (з дискретністю 4,4 кГц). На схемі (рис. 2, а) блок Slider Gain має один вхід і генерує один вихід.

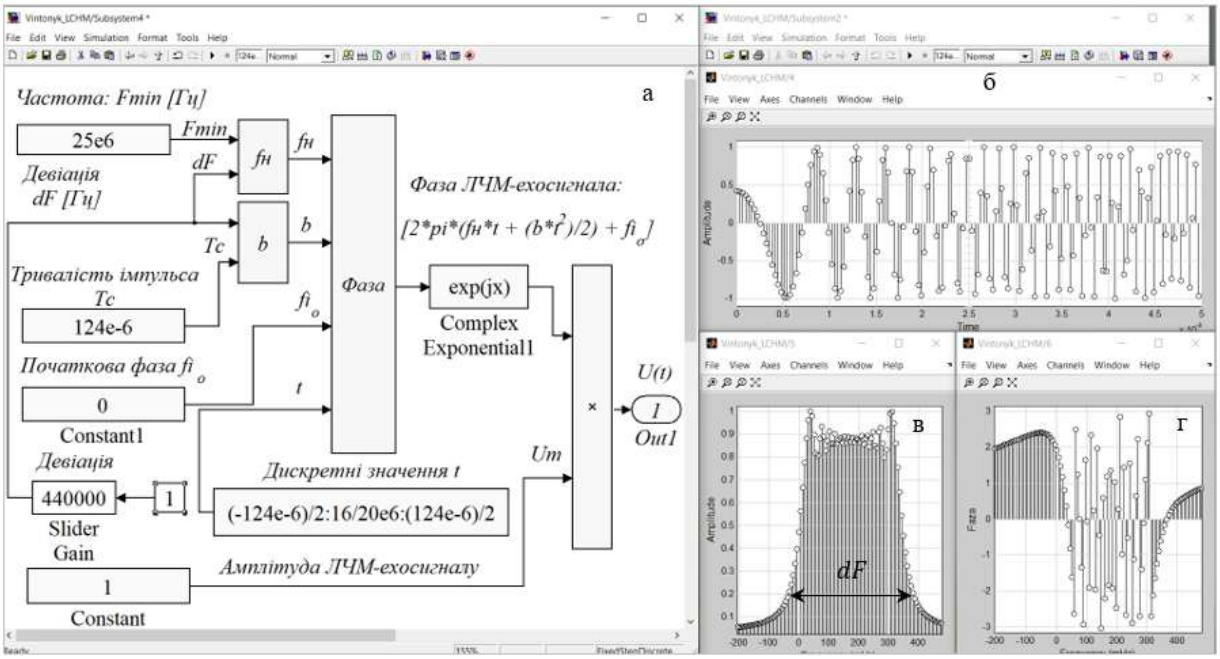

Рисунок 2 – Імітатор дискретного ЛЧМ-екосигналу [Розроблено авторами]:
а – Simulink-модель імітатора дискретного ЛЧМ-екосигналу; б – імітований дискретний ЛЧМ-екосигнал;
в – АЧС імітованого дискретного ЛЧМ-екосигналу; г – ФЧС імітованого дискретного ЛЧМ-екосигналу

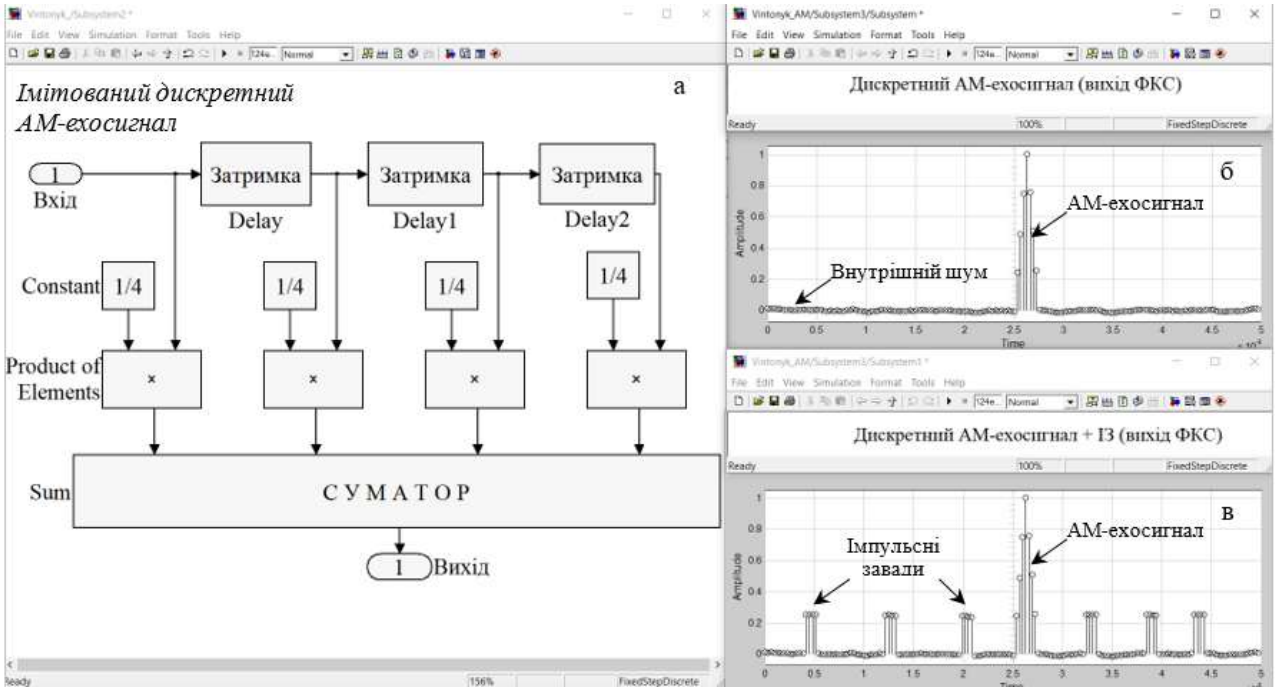

Рисунок. 3 – Simulink-модель алгоритму обробки дискретного АМ-екосигналу [Розроблено авторами]:
а – Simulink-модель ФКС; б – імітований дискретний АМ-екосигнал на виході ФКС; в – імітований дискретний АМ-екосигнал та імпульсні завади на виході ФКС

На рис. 2, в наведено АЧС імітованого дискретного ЛЧМ-екосигналу. Для побудови АЧС в моделі застосовується блок Magnitude FFT [4] (на рис. 2, а цей блок не показано). Даний блок попередньо налаштовується для обчислення величини швидкого перетворення Фур'є (далі – ШПФ) вхідного сигналу з необов'язковим доповненням нуля. У нашому випадку кількість точок ШПФ становить 156 (на одиницю більше, враховуючи те, що модель розраховує час з урахуванням нульового відліку). Можемо бачити, що ширина спектру дискретного ЛЧМ-екосигналу визначається девіацією частоти dF

© І. М. Невмержицький, О. М. Колеснік, О. О. Костиря
This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

(у нашому випадку dF=440 кГц) (рис. 2, в). Форма АЧС ЛЧМ-ехосигналу прямокутна з рівномірним розподілом спектральної щільності, лише зверху є характерні нерівності у вигляді коливань (рис. 2, в). Фазочастотний спектр імітованого дискретного ЛЧМ-ехосигналу (рис. 2, г) характеризує розподіл за частотою початкових фазових гармонічних складових повного спектра дискретного ЛЧМ-ехосигналу.

Наступним етапом моделювання було створення Simulink-моделі алгоритму обробки простого «гладкого» АМ-ехосигналу та Simulink-моделі алгоритму обробки складного широкосмугового ЛЧМ-ехосигналу. З аналізу концептуальної моделі алгоритму обробки простого «гладкого» АМ-ехосигналу випливає, що оптимальним фільтром для його обробки (фільтрації) є 4-х точковий фільтр ковзного середнього (далі – ФКС). Враховуючи те, що тривалість простого «гладкого» АМ-ехосигналу в РЛС «Малахіт» становить T_c = 2,4 мкс [3] (тобто три дискрета по 0,8 мкс), для його узгодженої фільтрації ефективна смуга пропускання узгодженого фільтра становить $F_{еф} = 1{,}37/T_c$. Simulink-модель алгоритму обробки дискретного АМ-ехосигналу показана на рис. 3.

Порівнюючи рис. 1, б, в та рис. 3, б, в можна помітити, що ФКС ефективно згладжує дискретні сигнали, тривалість яких менша тривалості простого «гладкого» АМ-ехосигналу, а сигнали ІЗ тривалістю 1 дискрета будуть згладжуватися даним фільтром – фільтр зменшує амплітуду таких сигналів та ніби «розпорошує» сигнал ІЗ за дальністю. АМ-ехосигнал тривалістю 4 дискрета згладжується 4-х точковим ФКС найкраще, однак, його тривалість збільшується за таких умов у два рази.

З аналізу концептуальної моделі алгоритму обробки широкосмугового складного ЛЧМ-ехосигналу випливає, що оптимальним фільтром для його обробки (фільтрації) є оптимальний 155-точковий стискаючий фільтр ЛЧМ-ехосигналу, у якому відбувається згортка дискретного ЛЧМ-ехосигналу з його імпульсною характеристикою (далі – ІХ). На виході фільтра отримуємо результат обробки у вигляді АКФ ЛЧМ-ехосигналу.

Simulink-модель алгоритму обробки широкосмугового складного ЛЧМ-ехосигналу наведено на рис. 4.

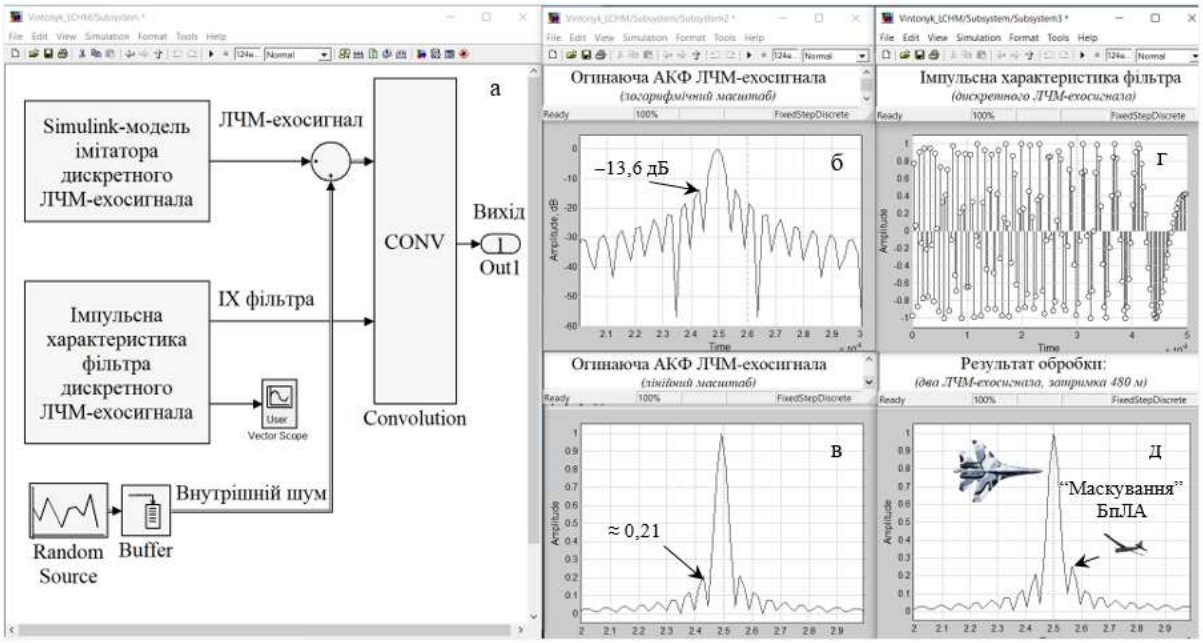

Рисунок. 4 – Simulink-модель алгоритму обробки дискретного ЛЧМ-ехосигналу [Розроблено авторами]:
а – Simulink-модель стискаючого фільтра ЛЧМ-ехосигнала; б – огинаюча АКФ ЛЧМ-ехосигнала (логарифмічний масштаб); в – огинаюча АКФ ЛЧМ-ехосигнала (лінійний масштаб);
г – імпульсна характеристика фільтра дискретного ЛЧМ-ехосигнала;
д – результати обробки (два ЛЧМ-ехосигнала, затримка 480 м)

Операція згортки реалізується за допомогою блока Convolution з бібліотеки блоків DSP System Toolbox пакета Simulink (рис. 4, а). Даний блок дозволяє згортку на два входи в часовій або частотній площині [4]. Щоб дозволити блоку Convolution обчислювати згортку в площині, яка мінімізує кількість обчислень, необхідно встановити для параметра Computation domain (Домен обчислень) значення: Fastest (Найшвидший), а для мінімізації використання пам'яті – параметр Computation domain значення: Time (Час) [4].

Автокореляційна функція ЛЧМ-ехосигналу має основну пелюстку та БП (рис. 4, в). Причому рівень перших БП для даної бази ЛЧМ-ехосигналу, а це 54,56, складає – 13,6 дБ (рис. 4, б). Насправді різниця у відношенні сигнал/шум для цілей з великою ЕПР (більше 10 м^2) та для цілей з малою ЕПР (менше 0,1 м^2) може становити більше як 20 дБ. У такому

випадку, при узгодженій фільтрації ЛЧМ-ехосигналів, БП відгуків сигналів від цілей з більшою ЕПР будуть майже такими як і головні пелюстки відгуків сигналів від цілей з малою ЕПР. Для підтвердження такого факту на рис. 4, д наведено результат обробки двох ЛЧМ-ехосигналів від цілей з різною ЕПР (відстань між цілями складає 480 м, різниця у відношенні сигнал/шум складає 10 дБ). Як результат – БП праворуч стисненого ЛЧМ-ехосигналу від цілі з більшою ЕПР «маскує» головну пелюстку відгуку стисненого ЛЧМ-ехосигналу від цілі (БпЛА) з меншою ЕПР.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Отже, створені за допомогою пакета Simulink візуально-імітаційні моделі алгоритму обробки простого «гладкого» амплітудно модульованого ехосигналу та алгоритму обробки складного широкосмугового сигналу з лінійно-частотною модуляцією в радіолокаційній станції «Малахіт» можуть бути використані для проведення досліджень щодо оцінки їх ефективності та забезпечать пошук нових більш ефективних алгоритмів обробки, при мінімальних витратах часу, коштів, а саме головне – ресурсу засобу радіолокації. Результати візуально-імітаційних експериментів із застосуванням створених Simulink-моделей, підтверджують їх працездатність та не суперечать вже відомим результатам.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані у напрямку створення Simulink-моделей алгоритмів цифрової обробки дискретних сигналів з різними законами внутрішньої імпульсної модуляції – лінійної та нелінійної частотної модуляції, вагової (віконної) обробки, з метою забезпечення мінімального рівня бічних пелюсток автокореляційної функції (від цього залежить спроможність радіолокаційної станції виявляти цілі з малою ЕПР, які знаходяться на незначних відстанях від цілі з великою ефективною площею розсіювання), за мінімальної ширини головної пелюстки автокореляційної функції (від цього залежить роздільна здатність радіолокаційної станції за дальністю).

Наочність візуально-імітаційних Simulink-моделей алгоритмів обробки комбінованого ехосигналу в радіолокаційної станції «Малахіт» надає можливість для суб'єктів освітнього процесу технічних університетів, що займаються дослідженнями алгоритмів цифрової обробки складних радіолокаційних сигналів, щодо їх застосування у якості електронного дидактичного засобу навчання.

Список бібліографічних посилань

1. UST.COM.UA. РЛС «МАЛАХИТ». URL: http://ust.com.ua/item/rls-malaxit-2 (дата звернення: 24.05.2025). **2. UOE.COM.UA.** П-18МА. URL: http://uoe.com.ua/products/ua/?id=0&pid=catalogue&language=ukr&catalogue_id=507&type=content (дата звернення: 27.05.2025). **3. Гризо А. А., Альчаков О. О., Лашкул І. М., Полтавець В. А.** Пропозиції щодо використання багаточастотного зондуючого сигналу для підвищення якості завадозахисту модернізованих РЛС П-18МА та П-18 Малахіт. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України.* 2019. № 2(35). С. 143–150. DOI: 10.30748/nitps.2019.35.18. **4. Dabney J. B. and Harman T. L.** Mastering SIMULINK 4. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001. 412 p. **5. Using Simulink (Version 5)**. The MathWorks, Inc., Natick, MA, July 2002. 556 p. **6. Невмержицький І. М., Гризо А. А., Малишев О. А., Купрій В. М.** Моделювання елементів систем озброєння радіотехнічних військ засобами візуально-імітаційного моделювання Simulink. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2009. № 1(19). С. 66–69. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2009_1_17 (дата звернення: 27.05.2025). **7. Невмержицький І. М., Гризо А. А., Дідковський А. О.** Проєктування візуально-імітаційного Simulink-додатка для моделювання адаптивних алгоритмів захисту радіолокаційних станцій радіотехнічних військ від активних шумових завад. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони.* 2023. № 1(46). С. 56-62. DOI: 10.33099/2311-7249/2023-46-1-56-62. **8. Невмержицький І. М., Гризо А. А., Матвійчук М. А., Семенов В. С., Гуйда Е. І.** Проєктування візуально-імітаційних додатків для моделювання алгоритмів селекції рухомих цілей існуючих та модернізованих РЛС РТВ за допомогою пакету Simulink. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України.* 2017. № 2(27). С.105–109. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2017_2_23 (дата звернення: 27.05.2025). **9. Костиря О. О., Гризо А. А., Додух О. М.** Комбіновані двофрагментні радіолокаційні сигнали з лінійним та експоненціальним законами частотної модуляції. *Системи озброєння і військова техніка.* 2024. № 4(76). С. 58-64. DOI: 10.30748/soivt.2023.76.06.

VISUAL-SIMULATION MODELING OF DIGITAL PROCESSING ALGORITHMS OF COMBINED ECHO SIGNALS OF RADAR STATIONS OF RADIO ENGINEERING TROOPS

NEVMERZHITSKY Igor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kharkiv National Air Forces University named after I. Kozhedub, Kharkiv, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-5499-6785

KOLESNIK Oleksandr, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Kharkiv National Air Forces University named after I. Kozhedub, Kharkiv, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-8213-017X

KOSTYRIA Oleksandr, Doctor of Engineering Science, Senior Researcher, Leading Researcher, Kharkiv National Air Forces University named after I. Kozhedub, Kharkiv, Ukraine, https://orcid.org/0000-0003-3363-2015

The article is dedicated to the description of the general principles of visual-simulation modelling of algorithms for digital processing of combined echo signals of radar stations of the radio engineering troops of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine using the Simulink program package of the MATLAB system. ***The purpose of the article.*** *To*

show the possibility of practical use of the Simulink software package for creating visual-simulation models of algorithms for digital processing of combined echo signals in modern domestic surveillance radar stations of the radio engineering troops of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine. To provide recommendations to scientists and subjects of the educational process of technical universities, engaged in research into algorithms for digital processing of complex radar signals, on using the developed Simulink models of digital processing algorithms for assessment of their effectiveness and search for ways to improve them, as well as visual didactic teaching aids.

Research methods. *During the research, the basic principles of the systems approach were applied: structural and functional analysis of the modelling object, visual-simulation Simulink modelling, and a subsequent simulation experiment.*

Literature review. *Recent research has overlooked the issues of visual-simulation Simulink modelling of algorithms for digital processing of combined echo signals in radar stations of the radio engineering troops of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine.*

Research results. *The results of the study are obtained. A description of the general principles of creating a visual-simulation Simulink model of the algorithm for digital processing of the combined echo signal of the modern domestic surveillance radar station of the meter wave range "Malachite", which is in service with the units of the radio engineering troops of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine, is given. A Simulink model of a 4-point moving average filter has been created, which is optimal for digital filtering of a simple "smooth" echo signal, as well as a Simulink model of a 155-point compression filter, which is optimal for filtering a complex broadband echo signal with linear frequency modulation. The accuracy of the results of the Simulink models was verified during a simulation experiment. The experiment results are presented using oscillograms and graphs of the Simulink package. The presented experimental results confirm the performance of Simulink models of algorithms for digital processing of combined echo signals and do not contradict the already known results.*

Research novelty. *The scientific novelty of the conducted research lies in the application of the principles (methods) of visual-simulation modelling to create Simulink models of algorithms for digital processing of combined echo signals in modern domestic surveillance radar stations of the radio engineering troops of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine.*

Theoretical and practical significance. *The use of visual-simulation Simulink modelling allows us to solve the issue of researching the effectiveness of existing algorithms for digital processing of combined echo signals and to ensure the search for new, more effective processing algorithms, with minimal time, money and radar resources. It is also recommended that Simulink models be used in the educational process of technical universities engaged in researching algorithms for digital processing of complex radar signals as electronic visual didactic teaching aids.*

Conclusions and future work. *The created visual-simulation Simulink models of algorithms for digital processing of combined echo signals allow researching and assessing their effectiveness. Further research can be directed towards visual-simulation modelling of algorithms for digital processing of complex echo signals with different laws of internal pulse modulation to ensure the minimum level of the side lobes of the autocorrelation function, with the minimum width of its main lobe.*

Keywords: *visual-simulation modelling, Simulink model, radar station, digital processing algorithm, combined echo signal.*

References

1. ***UST.COM.UA.*** [online], (2025). Radar «Malachite». Available at: http://ust.com.ua/item/rls-malaxit-2. [Accessed: 27 May 2025]. **2.** ***UOE.COM.UA.*** [online], (2025). P-18MA. Available at: http://uoe.com.ua/products/en/?id=0&pid=catalogue&language=eng&catalogue_id=507&type=content [Accessed: 27 May 2025]. **3. Hryzo, A. A., Alchakov, O. O., Lashkul, I. M., Poltavets, B. A.,** (2019). Proposals for the Use of a Multi-Frequency Probing Signal to Improve the Quality of Interference Protection of the Modernized P-18MA and P-18 Malachite Radars. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy,* 2(35), 143–150. DOI: 10.30748/nitps.2019.35.18. **4. Dabney, J. B., Harman, T. L.,** (2001). *Mastering SIMULINK 4.* Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. **5. The MathWorks, Inc.,** (2002). Using Simulink (Version 5). The MathWorks, Inc., Natick, MA. **6. Nevmerzhitsky, I. M., Hryzo, A. A., Malyshev, O. A., Kuprii, B. M.,** (2009). Modelling of Elements of Systems of Arms of Radio Engineering Armies using Visual-Imitating Modelling SIMULINK. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl*. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2009_1_17 [Accessed: 27 May 2025]. **7. Nevmerzhitsky, I. M., Hryzo, A. A., Didkovskyi, A. O.,** (2023). Designing a Visual Simulation SIMULINK Application for Modelling Adaptive Algorithms for the Protection of Radars of Radio Engineering Troops Against Active Noise Interference. *Suchasni informatsijni tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony.* 1(46). 56–62. DOI: 10.33099/2311-7249/2023-46-1-56-62. **8. Nevmerzhitsky, I. M., Hryzo, A. A., Matviichuk, M. A., Semenov, B. C., Huida, E. I.** (2017). Designing Visual-Imitating Applications for Modeling Algorithms of Selection of Moving Targets for Existing and Modernized RTV Radars with SIMULINK Package. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbrojnykh Syl Ukrainy.* Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2017_2_23 [Accessed: 27 May 2025]. **9. Kostyria, O. O., Hryzo, A. A., Dodukh, O. M.** (2024). Combined Two-Fragment Radar Signals with Linear and Exponential Frequency Modulation Laws. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika.* 4(76). 58–64. DOI: 10.30748/soivt.2023.76.06.

Рукопис надійшов до редакції *31.05.2025*
Рукопис прийнято до друку після рецензування *08.07.2025*
Дата публікації *29.08.2025*