УДК 623.4.084:621.396.96

І. В. Помогаєв, Р. І. Жемонський

РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АКТИВНОЇ ГОЛОВКИ САМОНАВЕДЕННЯ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ХВИЛЬ ПЕРСПЕКТИВНОЇ ЗЕНІТНОЇ КЕРОВАНОЇ РАКЕТИ

Анотація. *Розглянуто підхід до побудови узагальненої математичної моделі активної радіолокаційної головки самонаведення (АГСН) міліметрового діапазону хвиль як складної вимірювально-інформаційної системи. На основі модульної декомпозиції визначено основні складові моделі: формування та випромінювання сигналу, антенно-фідерний тракт, канал поширення, відбиття від об'єкта, приймання, цифрове опрацювання, оцінювання параметрів і контроль якості вимірювань. Запропоновано загальну операторну форму опису та визначено чинники, які необхідно враховувати під час оцінювання адекватності: атмосферні втрати, властивості радіопрозорих елементів, шуми, квантування, часові затримки й параметричну невизначеність. Окреслено процедуру верифікації моделі на контрольованих даних і критерії її подальшого вдосконалення. Робота має концептуально-методичний характер; конкретні конструктивні параметри та алгоритми керування перехопленням не розглядаються.*

Ключові слова: *активна головка самонаведення, міліметровий діапазон хвиль, математична модель, радіолокаційні вимірювання, модульна декомпозиція, невизначеність, верифікація.*

Abstract. *The paper outlines an approach to a generalized mathematical model of a millimeter-wave active radar seeker as a complex measurement and information system. A modular decomposition is used to describe signal generation and transmission, the antenna path, propagation, reflection, reception, digital processing, parameter estimation, and measurement-quality assessment. A general operator representation is proposed, together with factors relevant to model adequacy, including atmospheric attenuation, radome effects, noise, quantization, processing delays, and parameter uncertainty. A verification workflow using controlled data and criteria for further model refinement are outlined. The work is conceptual and methodological; specific design parameters and interception-control algorithms are not addressed.*

Keywords: *active seeker, millimeter-wave band, mathematical model, radar measurements, modular decomposition, uncertainty, verification.*

Математичне моделювання радіолокаційних систем дає змогу досліджувати взаємний вплив фізичних процесів, параметрів апаратури та цифрового опрацювання даних без проведення натурного експерименту для кожної комбінації умов. У сучасних українських дослідженнях розглядаються імітаційне моделювання цифрового оброблення ехосигналів, моделі радіолокаційних сигналів та підходи до виявлення повітряних об'єктів [1–3]. Окрему увагу приділено математичному опису завад у приймальних пристроях радіолокаційних датчиків [4] і проблемам радіолокаційного виявлення малорозмірних цілей [5].

Метою роботи є обґрунтування пропозицій щодо структури математичної моделі АГСН, визначення її головних функціональних блоків, формалізація зв'язків між ними та окреслення методики перевірки адекватності моделі.

Вихідним положенням є подання АГСН як модульної системи, у якій кожний блок має визначені вхідні змінні, параметри, оператор перетворення та вихідні дані. У загальному вигляді модель можна представити як множину взаємопов'язаних модулів:

$$\mathrm{M} = \left\{\mathrm{Ms},\ \mathrm{Ma},\ \mathrm{Mp},\ \mathrm{Mr},\ \mathrm{Md},\ \mathrm{Me},\ \mathrm{Mv}\right\}, \qquad (1)$$

де Ms — узагальнений опис сигналу; Ma — антенно-трактова складова; Mp — модель поширення; Mr — приймальний тракт; Md — цифрове опрацювання даних; Me — оцінювання параметрів; Mv — перевірка якості та верифікація. Така декомпозиція зберігає системні зв'язки й водночас дає змогу перевіряти окремі блоки незалежно. Доцільність модульного опису узгоджується з українськими працями з імітаційного моделювання радіолокаційних ехосигналів і математичного подання сигналів та вимірювань [1–3].

Кожний модуль доцільно описувати уніфікованим операторним співвідношенням:

$$y_i = F_i\left(x_i, p_i, w_i\right) + n_i, \tag{2}$$

де x_i — вектор вхідних даних; p_i — параметри модуля; w_i — опис зовнішніх умов; n_i — сукупність похибок і випадкових збурень; $F_i(\cdot)$ — оператор перетворення; y_i and — вихідні дані модуля. Для всієї системи це дає змогу записати загальну залежність $y = F\left(x, p, w, n\right)$ не фіксуючи на цьому етапі конструктивних параметрів конкретного виробу.

Важливим елементом моделі є опис невизначеності. До її джерел належать похибки калібрування, шум вимірювального каналу, квантування цифрових відліків, нестабільність часових і частотних характеристик та зміна властивостей середовища. Для кожної складової потрібно зазначити, чи задається вона детермінованим інтервалом, статистичним розподілом або сценарним набором значень. Це дає змогу розрізняти невизначеність параметрів, випадкові похибки та структурні обмеження моделі. Важливість окремого опису завад у приймальному тракті підтверджується дослідженнями математичних моделей комбінованих перешкод [4].

Для моделювання середовища доцільно передбачити окремий блок, параметри якого можуть змінюватися незалежно від решти системи. Значення параметрів середовища мають задаватися на основі перевірених довідкових даних або контрольних вимірювань із зазначенням діапазону застосовності, прийнятих припущень і меж точності. Вплив радіопрозорих конструктивних елементів також слід представляти як окрему невизначену складову, яку належить оцінювати за доступними експериментальними даними, а не задавати довільно.

Цифровий тракт доцільно моделювати як послідовність абстрактних перетворень даних: дискретизація, фільтрація, формування ознак, виявлення спостережень і оцінювання параметрів. Українські дослідження демонструють застосування імітаційних моделей для перевірки алгоритмів цифрового оброблення комбінованих ехосигналів, а також математичного опису та аналізу сигналів у радіолокаційних вимірюваннях [1, 2]. У цій роботі такі операції розглядаються на рівні загальної структури, а їхня конкретна реалізація має визначатися метою дослідження та вимогами до відтворюваності. Питання виявлення повітряних об'єктів і чинників, що впливають на радіолокаційну помітність, розглянуто в сучасних українських публікаціях [5].

Окремим завданням є верифікація. На першому етапі перевіряється коректність реалізації математичних залежностей і баланс одиниць вимірювання. На другому, перевіряється робота окремих модулів на синтетичних тестах із відомими властивостями. На третьому, перевіряється чутливість вихідних показників до варіювання параметрів і припущень. На четвертому, за наявності належно отриманих контрольних даних, здійснюється порівняння модельних результатів із незалежними вимірюваннями. Результати слід подавати разом із похибками, інтервалами невизначеності та описом умов, за яких модель перевірялася.

Для оцінювання якості моделі пропонується застосовувати сукупність критеріїв: структурну відповідність задуманої системи її концептуальній схемі; узгодженість статистичних характеристик вихідних даних із контрольними даними; стійкість висновків до зміни припущень; відтворюваність повторних запусків; а також обчислювальну прийнятність. Один узагальнений показник не завжди достатній: різні критерії характеризують різні аспекти адекватності, тому результати доцільно подавати у вигляді набору метрик.

Науково-методична відмінність запропонованого підходу полягає не лише в поділі системи на функціональні блоки, а й у застосуванні до кожного з них єдиного опису входів, параметрів,

зовнішніх умов, похибок і виходів. На відміну від загальної послідовної структурної схеми, таке подання дає змогу локалізувати джерело розбіжностей, перевіряти модулі окремо та простежувати, як невизначеність параметрів одного блока впливає на результати наступних етапів. Перевагою є можливість поетапної верифікації без повторної перевірки всієї моделі після кожної локальної зміни, а також прозоре документування припущень і меж застосовності. Це є методичною перевагою запропонованої структури; її кількісна ефективність потребує подальшої перевірки на контрольних даних.

Сформовано пропозиції щодо побудови узагальненої математичної моделі активної радіолокаційної головки як модульної вимірювально-інформаційної системи. Запропоновано операторне подання функціональних блоків і визначено необхідність явного опису похибок, невизначеності та впливу середовища. Для міліметрового діапазону обґрунтовано включення моделей атмосферного ослаблення з опорою на рекомендації ITU-R. Визначено поетапну процедуру верифікації — від синтетичних тестів до порівняння з незалежними контрольними даними. Подальша робота має бути спрямована на конкретизацію припущень, документування параметрів і кількісне оцінювання меж застосовності моделі.

Список використаних джерел:

1. Додух О. М., Петров О. В., Федоров А. В., Калімулін Т. М., Лещенко С. П. Розробка Frequency Modulated Continuous Wave радіолокаційної станції для виявлення малорозмірних цілей на базі технології Software Defined Radio. Системи обробки інформації. 2026. № 2(185). С. 53–65. DOI: https://doi.org/10.30748/soi.2026.185.07.

2. Невмержицький І. М., Колеснік О. М., Костиря О. О. Візуально-імітаційне моделювання алгоритмів цифрової обробки комбінованих ехосигналів радіолокаційних станцій радіотехнічних військ. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2025. Т. 53, № 2. С. 101–108. DOI: https://doi.org/10.33099/2311-7249/2025-53-2-101-108.

3. Ковальчук Д., Жила О. Геометрія вимірювань, моделі сигналів і алгоритми відновлення радіозображень в радарах із синтезованою апертурою, що використовують безперервні ЛЧМ-сигнали. Автоматизовані системи управління та прилади автоматики. 2025. № 187. С. 299–314. DOI: https://doi.org/10.30837/0135-1710.2025.187.299.

4. Мезенцев О. В., Буточнов О. М. Математична модель комбінованих перешкод у приймальних пристроях радіолокаційних датчиків зовнішньої інформації сучасних літальних апаратів. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2020. Т. 22, № 4. С. 71–78. URL: https://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001243434.

5. Галкін Ю. О., Залевський Г. С., Токар О. А., Ярощук В. В. Радіолокаційне виявлення безпілотних літальних апаратів різної конструкції та розмірів: проблемні питання та шляхи їх вирішення. Системи обробки інформації. 2025. № 4(179). С. 7–25. DOI: https://doi.org/10.30748/soi.2024.179.01.

Помогаєв Ігор Володимирович – старший викладач кафедри зенітних ракетних комплексів малої дальності Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: pomogaev5577@gmail.com ORCID https://orcid.org/0000-0002-6070-7062

Жемонський Роман Іванович – курсант Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: rzhemonskiy@gmail.com

Ihor Volodymyrovych Pomohaiev – Senior Lecturer of Department Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University (KNAFU), Kharkiv, 77/79 Sumska St., postcode 61023, e-mail: pomogaev5577@gmail.com https://orcid.org/0000-0002-6070-7062

Roman Ivanovich Zhemonskyi – cadet at the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, 77/79 Sumska St., postcode 61023, e -mail: rzhemonskiy@gmail.com