УДК 621.396.96:621.391.2

К. В. Сущик, Р. В. Волошан

ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧЕНИХ РАДІОПРИСТРОЇВ ДЛЯ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ПЕРЕДАВАЛЬНОГО КАНАЛУ РЛС

Анотація. *У роботі розглянуто особливості застосування технології програмно-визначеного радіо (SDR) для технічного обслуговування та контролю передавальних трактів радіолокаційних систем, можливості використання універсальних SDR-трансиверів та відкритого програмного середовища GNU Radio для спектрального аналізу й адаптації випробувальних сигналів в експлуатаційних умовах.*

Ключові слова*:програмно-визначене радіо, SDR, радіолокаційна система, технічна діагностика, передавальний канал, GNU Radio.*

Abstract. *This paper examines the features of applying software-defined radio (SDR) technology for the maintenance and control of radar system transmitting paths, the capabilities of using universal SDR transceivers and the open-source GNU Radio software environment for spectral analysis and test signal adaptation in operational conditions.*

Keywords: *software-defined radio, SDR, radar system, technical diagnostics, transmitting channel, GNU Radio.*

Розвиток сучасних радіолокаційних систем потребує впровадження гнучких засобів технічного обслуговування та контролю передавальних трактів, альтернативних громіздкому й затратному в експлуатації лабораторному обладнанню. Традиційні стаціонарні вимірювальні комплекси характеризуються значними масогабаритними показниками, обмеженою мобільністю та складністю адаптації до нових методик контролю. Перспективним напрямом подолання цих обмежень є застосування технології програмно-визначеного радіо (SDR), яка переносить ключові етапи формування, модуляції та обробки сигналів у цифрову область, забезпечуючи гнучку реконфігурацію вимірювального тракту програмними, а не апаратними засобами. Як апаратна основа діагностичних комплексів ефективно використовуються універсальні SDR-трансивери (зокрема, HackRF One), що забезпечують широкосмугове приймання та цифрову обробку сигналів у діапазоні робочих частот, достатньому для діагностики трактів РЛС[3].

Ключову роль у цій архітектурі відіграє відкрите програмне середовище GNU Radio, яке реалізує обробку даних на основі потокових графічних блок-схем (flowgraphs) і надає розробнику доступ до бібліотеки типових сигнальних блоків без необхідності низькорівневого програмування. Як зазначається у працях із сучасного програмованого радіо, використання відкритих програмних середовищ забезпечує гнучку потокову обробку даних, спектральний аналіз у реальному часі та можливість швидкого прототипування нових алгоритмів обробки без перепроєктування апаратної частини [1, 4].

Засобами GNU Radio виконується гнучке налаштування цифрових фільтрів, квадратурне перетворення та автоматична компенсація амплітудно-фазового дисбалансу I/Q-сигналів, що безпосередньо впливає на точність подальших вимірювань. Завдяки вбудованим математичним блокам швидкого перетворення Фур'є (FFT) та оцінки спектральної щільності потужності, GNU Radio забезпечує поглиблений спектральний аналіз у реальному часі, побудову водоспадних діаграм (waterfall) і точне вимірювання часових та частотних параметрів випробувальних сигналів. Такий підхід дозволяє програмно адаптувати випробувальні сигнали (зокрема, імпульсні послідовні сигнали, а також безперервні модульовані сигнали) під специфіку перевірки передавального каналу РЛС X-діапазону (~10 ГГц), забезпечуючи оперативний, точний і повторюваний контроль технічного стану тракту в реальних експлуатаційних умовах. Класичні принципи побудови радіолокаційних станцій вимагають постійного контролю технічного стану передавальних трактів та систематичної адаптації випробувальних сигналів до умов конкретного завдання [2, 3].

Водночас практична реалізація зазначеного підходу пов'язана з суттєвим технічним обмеженням: верхня межа робочого діапазону переважної більшості доступних SDR-пристроїв (зокрема, HackRF One) становить близько 6 ГГц не здатна напряму приймати та генерувати сигнали в діапазоні робочих частот РЛС X-діапазону (10-11 ГГц). Це зумовлено конструктивними особливостями трактів перетворення частоти та аналого-цифрових перетворювачів, що застосовуються в бюджетних SDR-платформах, частотний діапазон яких не охоплює сантиметровий діапазон НВЧ безпосередньо. Для усунення цього обмеження необхідне застосування додаткового зовнішнього перетворювача частоти який забезпечує перенесення сигналу з робочого діапазону РЛС у діапазон SDR-платформи (до 6 ГГц). Такий перетворювач, як правило, реалізується на основі змішувача та стабільного гетеродина, що дозволяє мінімізувати фазовий шум і забезпечити когерентність вимірювань. Введення зовнішнього перетворювача частоти ускладнює апаратну архітектуру діагностичного комплексу, проте дозволяє зберегти ключові переваги SDR-підходу: гнучкість, компактність і низьку вартість.

Впровадження запропонованого напряму розвитку дозволить здійснювати як повний демонтаж попередніх засобів обробки сигналів, що виконували часткову або повну обробку, так і часткову заміну окремих складових вимірювального тракту. Це, своєю чергою, дозволить зменшити габарити трактів обробки - від великих шаф обробки НВЧ-сигналів до мобільних, автономних і економічно доступних SDR-засобів, придатних до розгортання безпосередньо на об'єкті експлуатації. Істотною перевагою такого підходу є можливість постійного вдосконалення та пристосування до нових завдань шляхом модернізації, яка реалізується через зміну програмно-адаптивних складових на базі коду в GNU Radio, а не через заміну фізичних компонентів, як це традиційно застосовується для апаратних блоків обробки інформації. Таким чином, перехід на SDR-платформи створює передумови для суттєвого зниження вартості володіння діагностичним обладнанням і підвищення оперативності технічного обслуговування радіолокаційних систем.

Список використаних джерел:

1. Reyland J.M. Software Defined Radio : Theory and Practice. Norwood : Artech House, 2024. 253 p.
2. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. Principles of Modern Radar. Vol. I: Basic Principles. Edison : SciTech Publishing, 2010. 962 p.
3. Skolnik M.I. Radar Handbook, 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 2008. 352 p.
4. Шаповалов О.В., Бідун А.К., Клєвцов С.С. Методи та технології побудови програмно-визначуваних радіотехнічних систем. Харків : ХНУПС, 2026. 148 с.

Сущик Костянтин Володимирович – викладач кафедри зенітних ракетних комплексів малої дальності Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: ksushchyk@gmail.com, ORCID https://orcid.org/0009-0003-5799-7788.

Волошан Руслан Володимирович – курсант Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: ruslanvolosan4@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-6232-2686

Kostyantyn Volodymyrovych Sushchyk –lecturer of the Department of Short-Range Surface-to-Air Missile Systems Armament, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, 77/79 Sumska St., postcode 61023, e-mail: ksushchyk@gmail.com, ORCID https://orcid.org/0009-0003-5799-7788.

Ruslan Volodymyrovych Voloshan – cadet at the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, 77/79 Sumska St., postcode 61023, e-mail: ruslanvolosan4@gmail.com, ORCID https://orcid.org/0009-0004-6232-2686