

В.В. Павлюк

*Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова, Житомир*

## ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ БАГАТОКАНАЛЬНИХ ПРОГРАМНОВИЗНАЧЕНИХ КОМПЛЕКСІВ РАДІОКОНТРОЛЮ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

*У статті обґрунтовано вимоги, що висувуються до сучасних систем моніторингу телекомунікаційних мереж в умовах складної та динамічної радіоелектронної обстановки. Проаналізовано основні підходи до побудови багатоканальних програмновизначених радіоприймальних систем, визначено особливості реалізації апаратної та програмної багатоканальності. Подано результати розробки програмно-алгоритмічних рішень для реалізації програмновизначених радіоприймальних трактів, забезпечення розпаралелювання операцій цифрової обробки сигналу та когерентності пам'яті. Описано дослідний зразок програмно-апаратного комплексу багатоканального радіоконтролю телекомунікаційних систем, побудованого за технологію програмновизначеного радіо.*

**Ключові слова:** радіоконтроль, програмновизначене радіо, паралельні обчислення, багатопотокова цифрова обробка сигналів.

### Вступ

**Постановка проблеми.** В умовах сучасної складної та динамічної радіоелектронної обстановки актуалізуються завдання радіоконтролю телекомунікаційних мереж з метою забезпечення електромагнітної сумісності та ліцензованого використання радіочастотного ресурсу [1–2]. Звичайно, такі завдання вирішуються шляхом нарощування кількості комплектів радіоприймальної апаратури, кожен із яких організує один фізичний приймальний канал та забезпечує одночасний прийом однієї частотної смуги [2]. Також може використовуватись сканування визначеного переліку частот, проте це призводить до пропусків короткочасних сеансів радіозв'язку, що неприпустимо. Вказані підходи не забезпечують виконання завдань у повному обсязі та вимагають нарощування обсягу та складності апаратури. Загальна ж кількість сеансів радіозв'язку, що можуть перехоплюватись одночасно без втрат, все рівно дорівнює кількості комплектів радіоприймальної апаратури. Таким чином, розробка нових підходів до побудови програмно-апаратних комплексів багатоканального радіоконтролю телекомунікаційних систем є актуальним напрямком наукових досліджень та практичних розробок.

Для підвищення ефективності радіоконтролю телекомунікаційних систем пропонується використати технологію програмновизначеного радіо, що дає потенційні можливості реалізації складних та гнучких рішень при побудові радіоприймальних трактів [3–4].

Підходи до побудови програмно-апаратних комплексів багатоканального радіоконтролю передбачають застосування компактних багатоканальних пристроїв програмновизначеного радіо (ПВР) та

розробку програмно-алгоритмічного забезпечення для багатоканального (багатосмугового) радіоконтролю.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Переважна більшість існуючих досліджень та розробок спрямовані на реалізацію апаратної багатоканальності радіоприймальних систем радіозв'язку [5–8] та радіомоніторингу [9]. У працях [5–6] описано цифрові багатоканальні радіоприймальні пристрої для забезпечення короткохвильового радіозв'язку за декількома ідентичними за параметрами вузькосмуговими каналами. У [7–8] розглянуто принцип прийому симплексних декаметрових радіоканалів за допомогою багатоканального перепрограмуемого радіоприймального пристрою. Загальні принципи побудови та дослідні зразки багатоканальних розподілених систем радіомоніторингу наведено в [9], проте багатоканальність забезпечується лише апаратними засобами, що значно обмежує гнучкість, реконфігурабельність та мультимедійність системи. У [10] наводяться підходи до розпаралелювання операцій програмновизначеного радіоприйому, проте стосуються вони, головним чином, одноканальних систем. Загальними недоліками існуючих підходів до побудови багатоканальних радіоприймальних систем є розгляд лише обмежених, найпростіших випадків багатоканальності (канали ідентичні та самодостатні, синхронізація за входом та виходом відсутня, єдиної системи та методології керування ними не передбачається). Способи вирішення проблемних питань організації програмної та комбінованої апаратно-програмної багатоканальності систем радіомоніторингу у науковій літературі відсутні.

Отже, **метою досліджень** є обґрунтування та розробка підходів, схемотехнічних та програмно-

алгоритмічних рішень для створення програмно-апаратних комплексів багатоканального радіоконтролю телекомунікаційних систем.

## Викладення основного матеріалу

Мету досліджень досягнемо у такій послідовності:

обґрунтування основних підходів до побудови багатоканальних програмновизначених радіоприймальних систем;

визначення особливостей і способів реалізації апаратної та програмної багатоканальності;

розробка програмно-алгоритмічних рішень для реалізації програмновизначених радіоприймальних трактів;

дослідження можливостей та способів розпаралелювання операцій цифрової обробки сигналів та багатопотокового режиму роботи програмновизначених радіоприймальних трактів;

створення та перевірка працездатності дослідного зразка багатоканального програмно-апаратного комплексу радіоконтролю.

Основним підходом до побудови багатоканальних радіоприймальних систем слід вважати застосування технології ПВР [4; 10–11] та поєднання принципів апаратної та програмної багатоканальності.

Узагальнена структурна схема багатоканальної програмновизначеної системи радіомоніторингу пропонується у вигляді, що наведений на рис. 1.

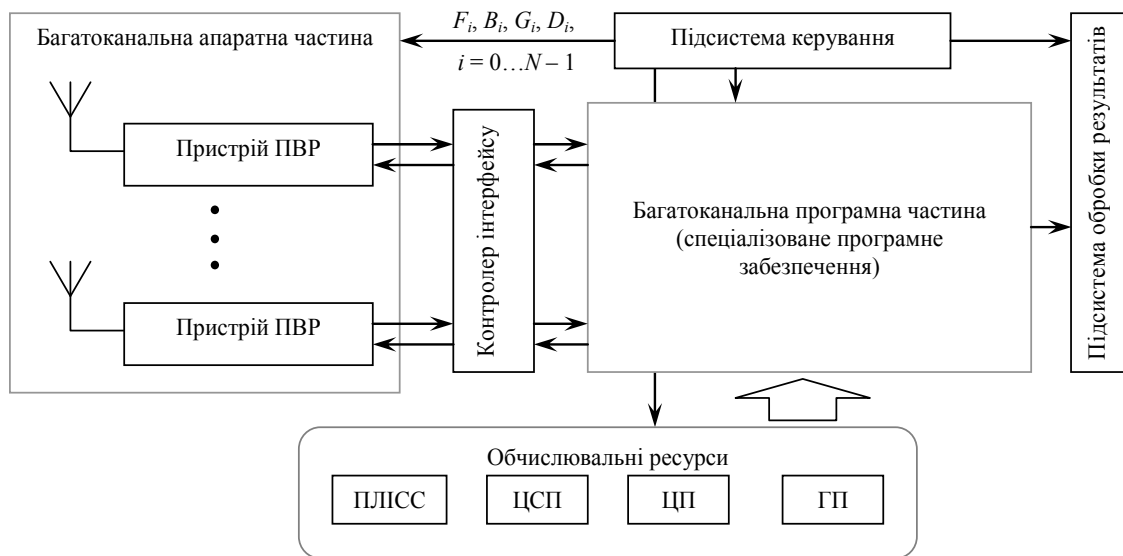


Рис. 1. Узагальнена структурна схема багатоканальної програмновизначеної системи радіомоніторингу

Апаратна багатоканальність передбачає застосування декількох однотипних чи різнотипних пристроїв ПРВ, об'єднаних контролером інтерфейсу. Кожен із них забезпечує покриття своєї ділянки частотного діапазону, утворення цифрового групового сигналу та передачу його до ЕОМ.

Кількість задіяних пристроїв ПРВ  $N$  та їх налаштування (центральна частота  $F_i$ , ширина робочої смуги частот  $B_i$ , коефіцієнт підсилення  $G_i$ , частота дискретизації  $D_i$ ) кожного із них повинна встановлюватись у залежності від завдань радіоконтролю та складності радіоелектронної обстановки.

За це відповідає підсистема керування – частина спеціалізованого програмно-алгоритмічного забезпечення ЕОМ. Також завданням підсистеми керування є розподіл наявних обчислювальних ресурсів, серед яких програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС), цифрові сигнальні процесори (ЦСП), центральні (ЦП) та графічні (ГП) процесори ЕОМ,

між обчислювальними завданнями багатоканальної програмної частини.

Контролер інтерфейсу та операційне середовище ЕОМ забезпечують реалізацію алгоритмів цифрової обробки сигналів (ЦОС) незалежно від того, яким пристроєм ПРВ цей сигнал отримано та якими були його налаштування. Крім того, більшість сучасних операційних середовищ забезпечують потужний інструментарій для реалізації паралельних, багатопроцесорних, багатопотокових та конвеєрних обчислень. Саме цей факт ставить ЕОМ на голову вище від ЦСП та ПЛІС як апаратну платформу для реалізації операцій ЦОС у програмновизначених системах.

Програмна багатоканальність передбачає реалізацію декількох програмних приймальних трактів у межах смуги частот кожного цифрового групового сигналу, отриманого пристроєм ПРВ. Узагальнена архітектура багатоканальної програмної частини наведена на рис. 2.

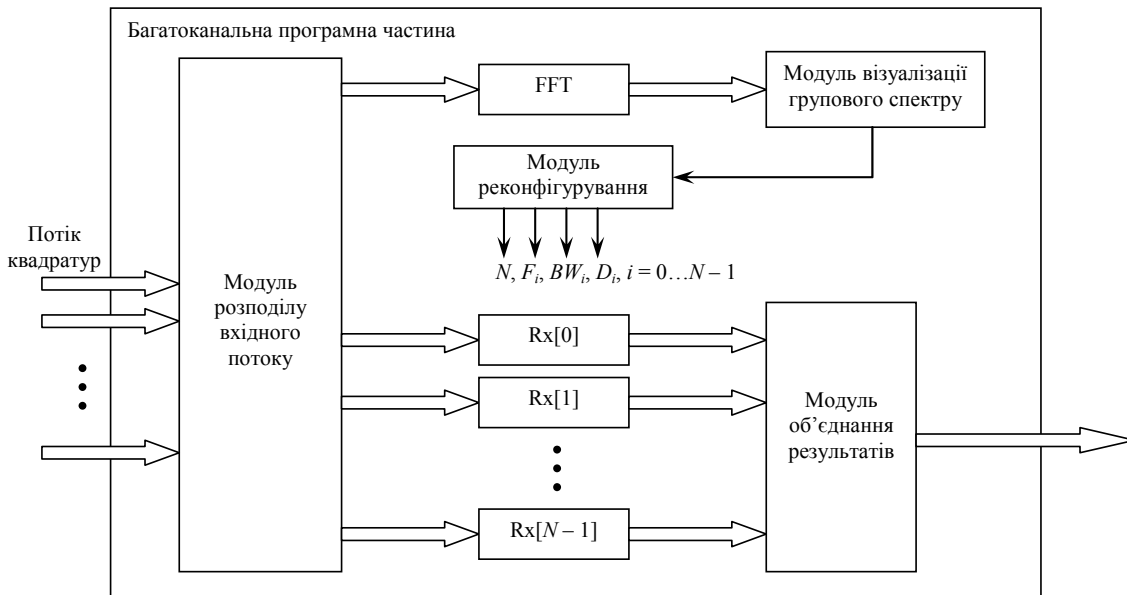


Рис. 2. Узагальнена архітектура багатоканальної програмної радіоприймальної частини

Основною складовою багатоканальної програмної частини є набір із  $M$  програмних приймальних трактів  $Rx_0 \dots Rx_{M-1}$ . Аналогічно до апаратної частини, їх кількість та налаштування кожного із них повинна встановлюватись у залежності від завдань радіоконтролю, за що відповідає модуль реконфігурування у поєднанні із модулем візуалізації групового спектру.

У порівнянні із апаратною, програмна багатоканальність є більш гнучкою та реконфігурубель-

ною. Фізично кількість програмних приймальних каналів обмежується доступною обчислювальною потужністю, та може складати від декількох десятків до декількох тисяч.

Типова архітектура програмного приймального тракту в цілому усталена та містить модуль частотного перенесення, дециматор, цифровий фільтр низьких частот (ФНЧ), виявлювач корисного сигналу та демодулятор, як це наведено на рис. 3 [11].

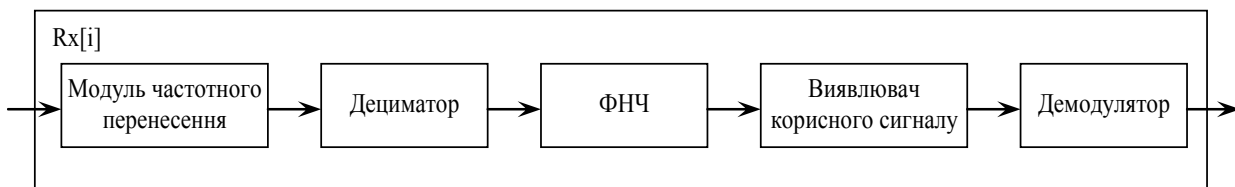


Рис. 3. Архітектура програмного приймального тракту

У залежності від завдань може змінюватись склад та параметри складових частин тракту, а також тип та налаштування демодулятора. Важливою особливістю є те, що реконфігурація може бути здійснена миттєво при зміні параметрів корисного сигналу.

Програмно реалізовані приймальні тракти можуть бути як однаковими, так і різними. У першому випадку їх архітектура, обчислювальна складність і всі параметри, окрім центральної частоти, є однаковими. При цьому, значно спрощуються структури модулів розподілу вхідного потоку та об'єднання результатів. Реалізувати таку сукупність приймальних трактів, а також організувати їх сумісну, і навіть когерентну, роботу порівняно нескладно, як це наведено в [6–7].

Другий випадок передбачає застосування приймальних трактів із різною архітектурою. Для кожного із них існує свій набір налаштувань, типів процедур ЦОС, форматів та обсягів даних. Цей випадок є більш цікавим, оскільки дає змогу одночасно виділяти, аналізувати та обробляти декілька різних видів сигналів, що приймаються у межах смуги пропускання пристрою ПВР.

Основні труднощі реалізації програмної багатоканальності полягають у розпаралелюванні операцій ЦОС, розподілі ресурсів процесора між обчислювальними потоками, забезпеченні когерентності пам'яті та атомарності операцій, синхронізації процесів і даних [12]. Незважаючи на значний розвиток сучасної теорії та практики паралельних обчислень більшість із цих завдань, як і забезпечення програм-

ної багатоканальності в цілому, залишаються невирішеними.

Найбільш критичним з точки зору забезпечення когерентності пам'яті є модуль розподілу вхідного потоку. За своєю специфікою його робота описується класичною моделлю «Письменники – читачі» [12]. «Письменниками» тут виступають обчислювальні потоки, що заносять до «бібліотеки» масиви комплексних відліків, отриманих від пристроїв ПВР. «Читачами» є потоки, що їх зчитують та передають до програмних приймальних трактів. «Бібліотекою» є доступна область пам'яті, а когерентність її використання передбачає розмежування у часі операцій запису та зчитування. Додатковими особливостями, що не враховуються у класичній моделі та стосуються розгляданого випадку розподілу потоку, є такі:

кожен «письменник» має свою «бібліотеку»: кожен пристрій ПВР приймає виділену йому смугу частот і здійснює оцифрування із заданою частотою дискретизації; будь-які змішування масивів відліків від різних пристроїв ПВР не допускається;

усі «читачі» допущені до усіх «бібліотек»: центральна частота програмно визначеного приймального тракту задається модулем реконфігурування та може знаходитись у межах приймальної смуги будь-якого пристрою ПВР;

«письменники» та «читачі» можуть відвідувати «бібліотеки» не регулярно: затримки та запізнення можуть виникати у випадках перевантаження обчислювальних чи накопичувальних пристроїв;

«бібліотеки» можуть бути тимчасово «зачинені»; фізично вони є запам'ятовуваними пристроями, працюють під керуванням драйвера та операційної системи та можуть не отримувати процесорного часу на обслуговування;

кожна «бібліотека» працює за принципом конвеєра фіксованої довжини, реалізується принцип FIFO (перший зайшов – перший вийшов), а обсяг доступної для зберігання цифрового потоку пам'яті обмежений технічними характеристиками запам'ятовуваних пристроїв.

Таким чином, ситуація досить не проста, проте сумісна робота «письменників», «читачів» та «бібліотек» цілком реалізується із застосуванням системних об'єктів синхронізації: подій, критичних секцій, м'ютексів та семафорів [13]. Робота модуля розподілу вхідного потоку організується відповідно до удосконаленої моделі «Письменники – читачі». Спрощене графічне подання моделі у вигляді сумісного алгоритму наведено на рис. 4.

Кожен «письменник» розпочинає свою роботу з отримання чергової порції даних від пристрою ПВР. Далі він здійснює послідовність операцій очікування, блокування, запису, розблокування та видачі повідомлення про наявність даних усім «читачам».

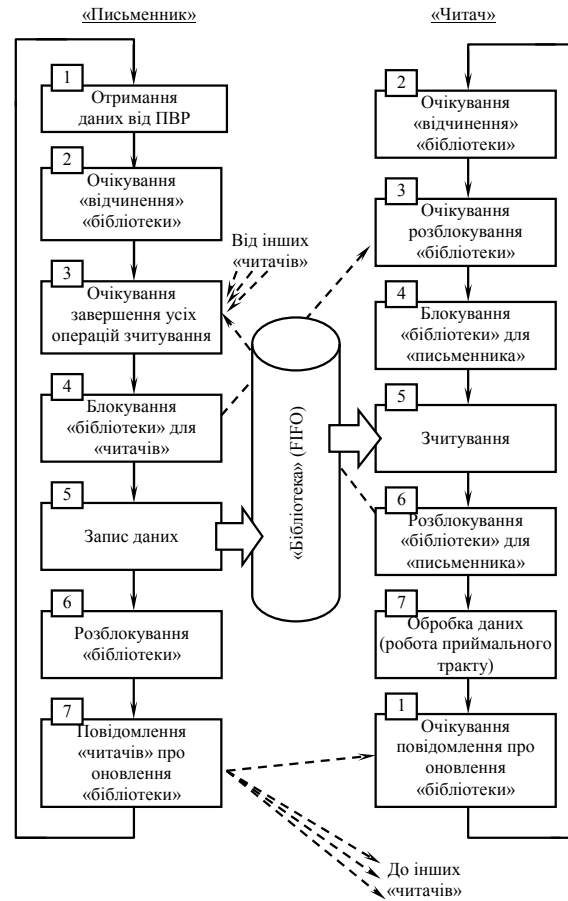


Рис. 4. Сумісний алгоритм роботи модуля розподілу вхідного потоку відповідно до удосконаленої моделі «письменники-читачі»

Усі «читачі» розпочинають свою роботу з очікування цього повідомлення лише від «свого» «письменника». Після проходження усіх необхідних етапів очікування, блокування, зчитування та розблокування здійснюється обробка даних (масиву відліків сигналу) у відповідності до архітектури та алгоритму роботи програмного приймального тракту (див. рис. 3). До алгоритмів роботи «письменників» та «читачів» включено етапи очікування «відчинення» бібліотеки, що може бути реалізовано за допомогою системних функцій WaitForSingleObject(), або спілків [13].

Важливим етапом розробки архітектури багатоканальної програмної частини є оцінювання можливостей обчислювальних ресурсів щодо реалізації необхідного обсягу операцій ЦОС. Кількість програмних приймальних каналів зазвичай співмірна або перевищує кількість обчислювальних ядер, тому для оцінки приросту швидкодії системи доцільно застосовувати удосконалений закон Амдала (EAmhdahl's Law) [14], що описується таким виразом:

$$S = \frac{1}{\alpha \left(1 - \beta + \frac{\beta}{t}\right) + \frac{1 - \alpha}{p}}, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – доля обчислень, що можуть виконуватись незалежно ( $0 \leq \alpha \leq 1$ );  $\beta$  – доля обчислень, що можуть бути розпаралелена на рівні потоків ( $0 \leq \beta \leq 1$ );  $p$  – кількість процесорів (ядер), що задіяні в обчисленнях;  $t$  – кількість задіяних обчислювальних потоків.

У першому наближенні вважається, що усі процесори рівнозначні: мають однакову обчислювальну потужність та пріоритет. Будемо вважати, що головна частина обчислювальних ресурсів витрачається на процедури ЦОС, що здійснюються у програмному приймальному тракті. Коефіцієнти  $\alpha$  та  $\beta$  у системі з  $M$  програмних приймальних трактів визначаються як

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^M P_i}{\sum_{i=1}^M W_i}, \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^M T_i}{\sum_{i=1}^M W_i}, \quad (3)$$

де  $P_i$ ,  $T_i$  та  $W_i$  – кількість незалежних операцій, операцій, що можуть бути розпаралелені на рівні потоків та загальна кількість операцій в  $i$ -му тракті відповідно. Враховуючи архітектуру тракту, наведену на рис. 3, незалежно можна виконати операції частотного перенесення  $W_F$  та половину операцій децимації  $W_D/2$ , тому

$$P_i = (W_F + W_D / 2)_i. \quad (4)$$

На рівні потоків можна розпаралелити другу половину операцій децимації  $W_D/2$  та половину операцій фільтрації  $W_{LPF}/2$ . Враховуючи те, що на фільтр подаються децимовані в  $K_D$  відліки, то

$$T_i = \left( W_D / 2 + \frac{1}{K_D} W_{LPF} \right)_i. \quad (5)$$

Загальна кількість операцій, що виконуються в  $i$ -му тракті, становитиме

$$W_i = \left( W_F + W_D + \frac{1}{K_D} (W_{LPF} + W_{Dem}) \right)_i, \quad (6)$$

де  $W_{Dem}$  – кількість операцій, що виконуються в демодуляторі. Коефіцієнт децимації  $K_D$  для сучасних програмно визначених радіоприймальних систем може становити від декількох десятків до декількох тисяч [15]. Функціонування цифрового демодулятора передбачається лише в однопоточковому режимі.

Проведені моделювання з урахуванням обчислювальних потреб (4–6), кількості обчислювальних ядер  $p$ , яка для сучасних центральних процесорів складає від 4 до 32, а графічних – до 3840, та кількості потоків  $t$  від декількох десятків до декількох сотень дозволили зробити такі висновки:

застосовуючи існуючі алгоритми та процедури ЦОС, розпаралелити можливо від 75 до 90 % операцій, що здійснюються приймальним трактом;

найбільший приріст швидкодії системи  $S$  досягається при кількості ядер, що не перевищує кількість трактів.

Експериментальну перевірку запропонованих підходів до побудови багатоканальних програмно визначених комплексів радіоконтролю здійснено шляхом розробки та випробувань дослідного зразка системи, що складається з апаратної та програмної частин.

Апаратна частина являє собою чотириканальний цифровий радіоприймальний пристрій, що забезпечує прийом радіосигналів у діапазоні частот 24...1750 МГц. Зовнішній вигляд апаратної частини наведено на рис. 5.



Рис. 5. Дослідний зразок чотириканального радіоприймального пристрою (апаратна частина)

Кожен приймальний канал керується незалежно за центральною частотою, шириною смуги пропускання, частотою дискретизації та коефіцієнтом підсилення. Загальна смуга частот одночасного прийому складає близько 12 МГц.

У межах кожного апаратного каналу забезпечено можливість створення та налаштування декількох програмних приймальних каналів (смуг). Для цього у розробленому спеціалізованому програмно-алгоритмічному забезпеченні реалізовано підходи до розподілу обчислювальних ресурсів, розпаралелювання операцій обробки сигналів та проведення найбільш ресурсоємних обчислень на графічному процесорі EOM. Це дає змогу на EOM з ЦП Intel Core i7 3.6 GHz та ГП GTX 9600 організувати до 400 приймальних каналів, які працюють, одночасно забезпечуючи постійне спостереження та реєстрацію смугових сигналів без пропусків та втрат. Для кожного частотного каналу передбачено можливість встановлення центральної частоти, ширини смуги прийому, типу демодулятора, параметрів візуалізації, режимів реєстрації, порогового рівня, за яким

відбувається виявлення сигналу. У кожному приймальному каналі забезпечується можливість програмної реалізації демодуляторів відомих аналогових і цифрових видів модуляції, протоколів передачі даних. Додатково на програмне забезпечення покладено функції керування апаратною частиною, ведення бази даних радіовипромінювань та візуалізацію спектрограми за всіма приймальними каналами.

Практичне застосування розроблених дослідних зразків та прототипів показало працездатність запропонованих підходів до побудови багатоканальних програмновизначених систем радіомоніторингу.

## Висновки

Здійснення радіомоніторингу в умовах динамічної радіоелектронної обстановки вимагає розробки та застосування нових підходів до побудови програмно-апаратних комплексів. Серед найбільш важливих завдань є постійне спостереження за радіосигналами телекомунікаційних мереж, що вимагає нарощування обсягів та складності радіоприймальної апаратури.

У статті обґрунтовано основні підходи до побудови багатоканальних програмновизначених радіоприймальних систем, основані та принципах поєднання апаратної та програмної багатоканальності

та застосуванні технології програмновизначеного радіо.

Розроблено структурні схеми та архітектуру багатоканальної програмної радіоприймальної частини, складових програмновизначеного радіоприймального тракту.

Розроблено алгоритм роботи модуля розподілу потоку, що базується на розширеній моделі «Письменники – читачі». Досліджено можливості та способів розпаралелювання операцій цифрової обробки сигналів та багатопотокового режиму. Показано, що найбільший приріст швидкодії системи досягається при кількості ядер процесора, що не перевищує кількість програмновизначених приймальних трактів.

Перевірку працездатності запропонованих підходів здійснено методом комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень. Розроблено та випробувано дослідний зразок багатоканальної програмновизначеної системи радіоконтролю у складі апаратної частини та спеціалізованого програмного забезпечення.

Напрямами подальших досліджень можуть бути розробка рішень для реалізації матриці програмновизначених трактів та дослідження способів забезпечення максимальної повноти радіоконтролю багатоканальною програмновизначеною радіоприймальною системою.

## Список літератури

1. Слободянюк П.В. Радиомониторинг: вчера, сегодня, завтра / П.В. Слободянюк, В.Г. Благодарный; под общ. ред. П.В. Слободянюка. – Прилуки: ООО «Издательство «Air-Поліграф», 2010. – 296 с.
2. Рембовский А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин. – 2-е изд. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 624 с.
3. Handbook. Spectrum monitoring. – Geneva, Radiocommunication Bureau, 2011. – 678 p.
4. Johnson R. Software Receiver Design / R. Johnson, W. Sethares, A. Klein. – Cambridge: Cambridge University Press, 2011. – 481 p.
5. Банников И.М. Современные концепции развития многоканальных радиоприемных устройств и радиоприемных комплексов перспективных узлов коротковолновой связи / И.М. Банников // Успехи современной радиоэлектроники. – 2011. – № 11. – С. 6-11.
6. Банников И.М. Радиоприёмные устройства и радиоприёмные комплексы перспективных узлов коротковолновой связи / И.М. Банников, В.А. Березовский, М.М. Валеев, Г.К. Хазан // Международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь, РЭС-2011». – 2011. – С. 121-125.
7. Будко П.А. SDR-технологии и новые принципы приема сообщений в симплексных радиолиниях / П.А. Будко, С.Е. Жолдасов, Г.А. Жуков, Н.П. Будко // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2013. – № 1. – С. 34-38. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://cyberleninka.ru/article/v/sdr-tehnologii-i-novye-printsiipy-priema-soobscheniy-v-simpleksnyh-radioliniyah>.
8. Николашин Ю.Л. Повышение эффективности функционирования декаметровых радиолиний / Ю.Л. Николашин, П.А. Будко, Е.С. Жолдасов, Г.А. Жуков // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2015. – № 2. – С. 4-10. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-funktsionirovaniya-dekametrovyh-radioliniy>.
9. Васильев О.А. Многоканальные распределенные системы радиомониторинга TORNADO-RxMTCA® / О.А. Васильев, П.А. Семенов. – М.: Радиосервис, 2016. – 12 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.mlabsys.com/ml-press/AN/TARxMTCA\\_AN-1A\\_2016-01.pdf](http://www.mlabsys.com/ml-press/AN/TARxMTCA_AN-1A_2016-01.pdf).
10. Olofsson A. Implementing software defined radio on the paralella / A. Olofsson // Hot Chips 27 Symposium (HCS), 2015 IEEE. 22-25 Aug, 2015.
11. Grayver E. Implementing Software Defined Radio / E. Grayver. – Springer Science+Business Media, New York, 2013. – 270 p.
12. Лин К. Принципы параллельного программирования / К. Лин, Л. Снайдер. – М.: Издательство московского университета, 2013. – 408 с.

13. Czech Z. Introduction to Parallel Computing / Z. Czech. – Cambridge University Press, 2016. – 353 p.
14. Tang S. Speedup for Multi-Level Parallel Computing / S. Tang, B. Lee, B. Hee // 2012 IEEE 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum 2012 IEEE. – P. 537-546.
15. Павлюк В.В. Побудова високошвидкісних цифрових дециматорів на основі напівсмугових фільтрів з кінцевою імпульсною характеристикою / В.В. Павлюк, О.А. Нагорнюк, Б.В. Молодецький // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. пр. – Житомир: ЖВІ, 2015. – Вип. 12. – С. 60-67. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.zvir.zt.ua/images/stories/ZbirkNP/ZbirkNZHVI\\_12.pdf](http://www.zvir.zt.ua/images/stories/ZbirkNP/ZbirkNZHVI_12.pdf).

## References

1. Slobodjanjuk, P.V. and Blaghodarnj, V.Gh. (2010), “Radiomonitoring: vchera, seghodnja, zavtra” [Radio Monitoring: Yesterday, Today, Tomorrow], Air-Poligraf, Pryluky, 296 p.
2. Rembovskij, A.M., Ashykhmy, A.V. and Kozjmy, V.A. (2015), “Radiomonytoryng: zadachi, metodi, sredstva” [Radio Monitoring: tasks, methods, means], Ghorjachaja lynyja-Telekom, Moscow, 624 p.
3. Radiocommunication Bureau (2011), *Handbook. Spectrum monitoring*, Geneva, 678 p.
4. Johnson, R., Sethares, W. and Klein, A. (2011), *Software Receiver Design*, Cambridge University Press, 481 p.
5. Bannikov, I.M. (2011), “Sovremennye kontseptsii razvitiya mnogokanalnykh radiopriemnykh ustroystv i radiopriemnykh kompleksov perspektivnykh uzlov korotkovolnovoy svyazi” [Modern concepts of development of multi-channel radio receiving devices and radio receiving complexes of prospective short-wave communication units], *Uspehi sovremennoy radioelektroniki*, No. 11, pp. 6-11.
6. Bannikov, I.M., Berezovskiy, V.A., Valeev, M.M. and Hazan, G.K. (2011), “Radiopriyomnyye ustroystva i radiopriyomnyye komplekсы perspektivnykh uzlov korotkovolnovoy svyazi” [Radio receivers and radio receivers of prospective short-wave communication units], *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya “Radiotekhnika, elektronika i svyaz, REiS-2011”*, pp. 121-125.
7. Budko, P.A., Zholdasov, S.E., Zhukov, G.A. and Budko, N.P. (2013), “SDR-tehnologii i novyye printsipy priema soobscheniy v simpleksnykh radiolinnykh” [SDR-technologies and new principles of receiving messages in simplex radiolines], *Naukoemkie tehnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh zemli*, No 1, pp. 34-38, <https://cyberleninka.ru/article/v/sdr-tehnologii-i-novyye-printsipy-priema-soobscheniy-v-simpleksnykh-radiolinnykh> (accessed 11 Feb 2018).
8. Nikolashin, Yu.L., Budko, P.A., Zholdasov, E.S. and Zhukov, G.A. (2015), “Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya dekametrovykh radiolinnykh” [Improving the efficiency of decametric radio links], *T-Comm –Telekommunikatsii i Transport*, No 2, pp. 4-10, <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-funktsionirovaniya-dekametrovykh-radiolinnykh> (accessed 11 Feb 2018).
9. Vasilev, O.A. and Semenov, P.A. (2016), “Mnogokanalnyye raspredelennyye sistemy radiomonitoringa TORNADO-RxMTCA®” [Multichannel distributed radio monitoring systems], Radioservis, Moscow, 12 p, [www.mlabsys.com/mlpress/AN/TARxMTCA\\_AN-1A\\_2016-01.pdf](http://www.mlabsys.com/mlpress/AN/TARxMTCA_AN-1A_2016-01.pdf) (accessed 11 Feb 2018).
10. Olofsson, A. (2015), Implementing software defined radio on the paralella, *Hot Chips 27 Symposium (HCS) IEEE*, 25 Aug.
11. Grayver, E. (2013), *Implementing Software Defined Radio*, Springer Science+Business Media, New York, 270 p.
12. Lin, K. and Snyder, L. (2013), “Printsipy paralelnogo programmirovaniya” [Principles of parallel programming], Izdatelstvo moskovskogo universiteta, Moscow, 408 p.
13. Czech, Z. (2016), *Introduction to Parallel Computing*, Cambridge University Press, Cambridge, 353 p.
14. Tang, S., Lee, B. and Hee, B. (2012), Speedup for Multi-Level Parallel Computing, *IEEE 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum 2012 IEEE*, pp. 537-546.
15. Pavliuk, V.V., Naghornjuk, O.A. and Molodeckiy, B.V. (2015), “Pobudova vysokoshvydkisnykh cyfrovyykh decymatoriv na osnovi napivsmughovykh filjtriv z kincevoju impul'snoju kharakterystykoju” [Construction of high-speed digital decimators based on half-band finite impulse response filters], *Zbirnyk naukovykh pracj Problemy stvorennja, vyprobuvannja, zastosuvannja ta ekspluataciji skladnykh informacijnykh system*, No 12, Zhytomyr, pp. 60-67, [www.zvir.zt.ua/images/stories/ZbirkNP/ZbirkNZHVI\\_12.pdf](http://www.zvir.zt.ua/images/stories/ZbirkNP/ZbirkNZHVI_12.pdf) (accessed 11 Feb 2018).

Надійшла до редколегії 17.04.2018

Схвалена до друку 15.05.2018

### Відомості про автора:

#### Павлюк Володимир Володимирович

кандидат технічних наук старший науковий співробітник  
начальник науково-дослідної лабораторії наукового  
центру Житомирського військового інституту  
ім. С.П. Корольова,  
Житомир, Україна  
<https://orcid.org/0000-0001-9888-9378>

### Information about the author:

#### Volodymyr Pavliuk

Candidate of Technical Sciences Senior Research  
Head of Scientific Laboratory of Scientific Center  
of S.P. Koroliov Zhyomyr Military Institute,  
Zhyomyr, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-9888-9378>

## ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ПРОГРАМНООБУСЛОВЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ РАДИОКОНТРОЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

В.В. Павлюк

*В статье обоснованы требования, предъявляемые к современным системам мониторинга телекоммуникационных сетей в условиях сложной и динамичной радиоэлектронной обстановки. Проанализированы основные подходы к построению многоканальных программнообусловленных радиоприемных систем, определены особенности реализации аппаратной и программной многоканальности. Представлены результаты разработки программно-алгоритмических решений для реализации программнообусловленных радиоприемных трактов, обеспечения распараллеливания операций цифровой обработки сигнала и когерентности памяти. Описан опытный образец программно-аппаратного комплекса многоканального радиоконтроля телекоммуникационных систем, построенного по технологии программнообусловленного радио.*

**Ключевые слова:** радиоконтроль, программнообусловленное радио, параллельные вычисления, многопоточная цифровая обработка сигналов.

## APPROACHES TO THE CONSTRUCTION OF MULTI-CHANNEL SOFTWARE DEFINED RADIO CONTROL SYSTEM FOR THE TELECOMMUNICATION NETWORKS

V. Pavliuk

*The article substantiates the main approaches to the construction of multichannel radio-receiving systems based on the principles of combining hardware and software multichannel, and the application of the technology of a software-defined radio. The main difficulty in implementing a software multi-channel is to parallelize the digital signal processing operations, the allocation of processor resources between the processing threads, ensuring the memory coherence and operations atomicity, synchronization of processes and data.*

*The structural schemes and architecture of the multi-channel hardware and software defined radio-receiver, are developed. The algorithm of the flow distribution module based on the expanded model "Writers-Readers" is developed. The possibilities and means of parallelism of digital signal processing operations and multi-threaded mode are investigated. Using the EAdahl's Law it is shown that the highest theoretical speedup of the system execution is achieved with the number of processor cores not exceed the number of software defined receiving channels.*

*The verification of proposed approaches was carried out by computer modeling and experimental research. An experimental prototype of a multichannel software-defined radio control system, which consists of hardware and specialized software, is developed and tested.*

*Further researches can be directed to develop the matrix software-defined radio receivers and study the ways to ensure the maximum radio control covering by a multichannel software-defined radio control system.*

**Keywords:** radio control, software-defined radio, parallel computing, multi-thread digital signal processing.