

ПОБУДОВА АВТОМАТИЧНОГО КВАЗИДОПЛЕРІВСЬКОГО РАДІОПЕЛЕНГАТОРА ЗА ТЕХНОЛОГІЮ ПРОГРАМНО ВИЗНАЧЕНОГО РАДІО

Розглянуто підходи до реалізації квазидоплерівського методу радіопеленгування на основі технології програмно визначеного радіо. Розроблено структурну схему автоматичного програмно визначеного квазидоплерівського пеленгатора, запропоновано функціональну схему апаратної частини та архітектуру спеціалізованого програмного забезпечення. Реалізовано схемотехнічне рішення для синхронізації схеми комутації антенних елементів та програмного забезпечення обчислення пеленгу. Для згладжування вимірів пеленгу реалізовано процедуру аперіодичної фільтрації з урахуванням циклічної області їх значень. За допомогою математичного моделювання та експериментальних досліджень доведено, що побудова квазидоплерівського радіопеленгатора за технологією програмно визначеного радіо має такі ключові особливості у порівнянні із класичною реалізацією, як можливість пеленгування короткотривалих сигналів та реалізації алгоритмів статистичного згладжування, можливість пеленгування декількох частотних каналів одночасно, суттєве спрощення обробки радіопеленгаційної інформації, гнучкість та реконфігурабельність систем радіопеленгування. Розроблено дослідний зразок радіопеленгатора, у якому реалізовано запропоновані підходи, схемотехнічні та програмно-алгоритмічні рішення.

Ключові слова: радіопеленгування; квазидоплерівський метод; програмно визначене радіо.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Визначення напрямку на джерело радіовипромінювання (ДРВ) є одним із головних завдань, що повинні виконуватись системами радіомоніторингу та контролю використання радіочастотного ресурсу [20, 21]. Для виконання вимог сучасності системами радіомоніторингу повинні базуватись на підходах програмно визначеного радіо (ПВР), як і більшість існуючих та перспективних класів радіотехнічних систем [1]. Це дає змогу здійснювати швидке та гнучке реконфігурування приймальних трактів, реалізовувати методи виявлення, визначення параметрів, класифікації та демодуляції різних видів сигналів [1, 7]. Основною проблематикою є те, що радіопеленгатори вважаються окремими, досить складними частинами систем радіомоніторингу. Проте застосування підходів, які надає технологія ПВР, дозволяє значно спростити реалізацію відомих методів радіопеленгування, скоротити склад апаратної частини та реалізувати функції радіопеленгування у кожному програмно визначеному радіоприймачі.

У зв'язку із цим існує актуальне науково-практичне завдання, яке полягає у реалізації методів автоматичного радіопеленгування у системах радіомоніторингу, побудованих на основі технології ПВР.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на існуючі переваги технології ПВР, реалізація нескладних автоматичних радіопеленгаторів має певні труднощі. Так, кореляційно-інтерферометричні (кореляційно-фазові) методи пеленгування [20, 14] може бути здійснена лише у програмному вигляді, проте вимагає багатоканальної (від 3 до 9 каналів) ідентичної за характеристиками апаратної радіоприймальної частини та складних антенних систем [16]. За такими принципами побудовані російські радіопеленгатори сімейства «АРТИКУЛ» [11, 10] та вітчизняні «ВОСТОК-РП» та «БАРВІНОК» [13, 18]. Крім того, самі алгоритми пеленгування також складні, що вимагає їх реалізації винятково на цифрових сигнальних процесорах або ПЛІС [12]. Таким чином, відомі програмно визначені радіопеленгатори приблизно на порядок складніші за радіоприймачі, а існуючі схемотехнічні рішення не дозволяють реалізовувати гнучкість, яку забезпечує технологія ПВР. Існуючі радіоаматорські конструкції програмно визначених радіопеленгаторів роблять спробу реалізації фазового [9] та квазидоплерівського [6, 8, 15] методів пеленгування, проте реалізовані там схемотехнічні та програмні рішення не достатньо обґрунтовані, а їх реалізації мають суттєві недоліки.

Отже, **метою досліджень** є розробка схемотехнічних та програмно-алгоритмічних рішень для реалізації автоматичних радіопеленгаторів, побудованих на базі технології ПВР.

Викладення основного матеріалу. Мету досліджень досягнемо у такій послідовності операцій:

- аналіз вимог, що висуваються до програмно визначеного квазидоплерівського радіопеленгатора;
- аналіз квазидоплерівського методу радіопеленгування та можливостей реалізації на базі програмно визначеної радіоприймальної платформи;
- розробка структурної та функціональної схем апаратної частини, а також архітектури програмної частини програмно визначеного квазидоплерівського радіопеленгатора;
- дослідження математичних моделей, що описують показники якості функціонування програмно визначеного квазидоплерівського радіопеленгатора;
- реалізація та перевірка працездатності дослідного зразка програмно визначеного квазидоплерівського радіопеленгатора.

До програмно визначеного квазідоплерівського радіопеленгатора висуваються такі вимоги:

- використання *одного* апаратного приймального каналу;
- можливість реалізації декількох програмних пеленгаційних каналів у межах смуги пропускання апаратного приймального каналу;

Узагальнена структурна схема квазідоплерівського радіопеленгатора наведена на рисунку 1 [2, 4].

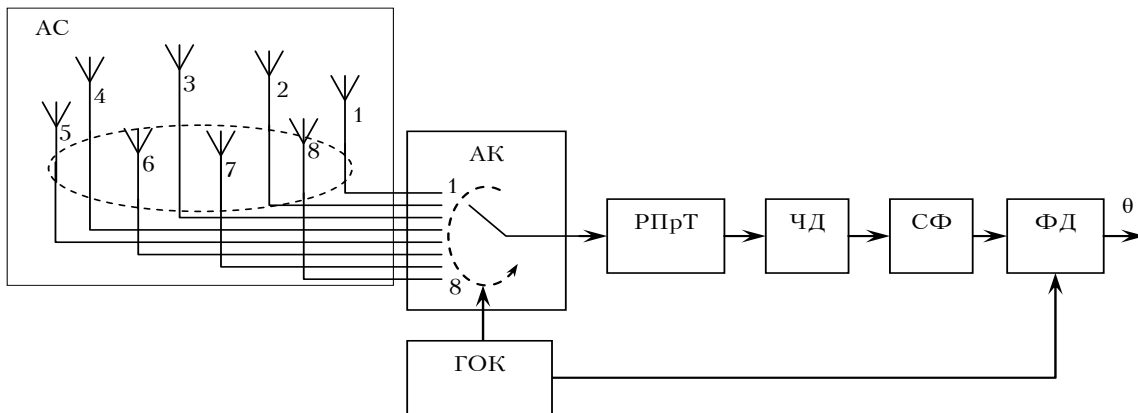


Рис. 1. Узагальнена структурна схема квазідоплерівського радіопеленгатора

До неї входять антенна система (АС) у вигляді всеспрямованих у площині пеленгування антен, розташованих по колу, антенний комутатор (АК), радіоприймальний тракт (РПРТ), частотний (ЧД) та фазовий (ФД) детектори, високочастотний смуговий фільтр (СФ) та генератор опорного коливання (ГОК). За сигналом, що надходить від генератора, АК здійснює циклічну комутацію елементів АС, вносячи доплерівський зсув частот до радіосигналу від ДРВ та утворюючи додаткову частотну модуляцію за гармонічним законом. У РПРТ здійснюється підсилення, селекція та прийом цього сигналу, а ЧД здійснює перетворення наданого доплерівського зсуву частот до гармонічного коливання напруги. Частота цього коливання дорівнює частоті комутації антенних елементів, а фаза θ , виокремлена за допомогою ФД, дорівнює відношенню пеленгу на ДРВ [2, 4].

Схема, наведена на рис. 1, цілком може бути реалізована за технологією ПВР. Одним із варіантів реалізації є створення апаратних приймальних каналів за кількістю антен в АС та реалізація функцій АК, Г, РПРТ, ЧД та ФТ у програмному вигляді, як це передбачає технологія ПВР. Проте такий варіант не дозволяє виконати першу із зазначених вище вимог, а саме використання *одного* апаратного приймального каналу.

Враховуючи зазначене вище, пропонується схема реалізації програмно визначеного квазідоплерівського радіопеленгатора, наведена на рисунку 2. Від попередньої схеми, наведеної на рисунку 1, залишилися АС, АК та ГОК. З виходу АК сигнал надходить до апаратного приймального каналу (АПрК). Він здійснює фільтрацію, гетеродинування та аналогово-цифрове перетворення (АЦП) у відповідності до центральної частоти групового сигналу (f_G), ширина смуги фільтру (B) та частоти дискретизації (R_S) та введення оцифрованих відліків до спецобчислювача.

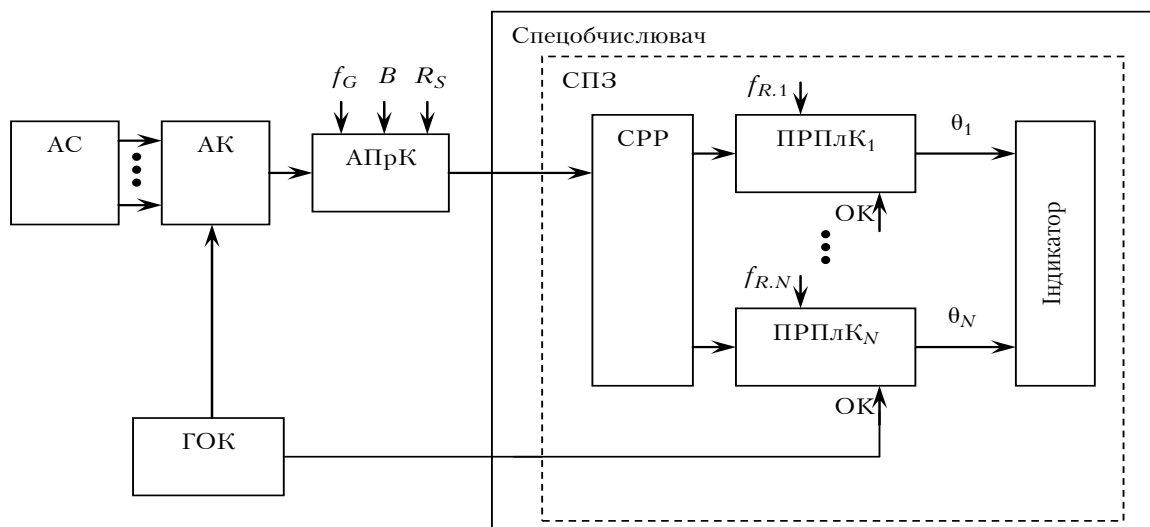


Рис. 2. Структурна схема програмно визначеного квазідоплерівського радіопеленгатора

Спеціалізоване програмне забезпечення (СПЗ) містить схему розподілу ресурсів (СРР) та N програмно реалізованих пеленгаційних каналів (ПРПлК), кожен із яких налаштований на відповідну відносну частоту $f_{R,i}$, $i=0..N$ та здійснює операції, за які відповідали РПрТ, ЧД та ФД у апаратній реалізації на рис. 1. Відносна частота програмного каналу $f_{R,i}$ є різницею його радіочастоти $f_{S,i}$ та частоти групового сигналу АПрК f_G :

$$f_{R,i} = f_{S,i} - f_G. \quad (1)$$

За порівнянням фази опорного колювання (ОК) та доплерівського зсуву частот обчислюються та відображаються на індикаторі пеленги θ_i , $i=0..N$ на ДРВ, що працюють на відповідних частотах.

Варто зазначити, що запропонована структурна схема, наведена на рисунку 2, є узагальненою. Вона може бути реалізована на всіх відомих типах АПрК (із використанням смугового гетеродинавання, квадратурного перетворення, прямого оцифрування чи інших) та спецобчислювачах (цифровий сигнальний процесор, ПЛІС, ЕОМ чи інший). Внутрішня архітектура та складові СПЗ можуть бути реалізовані у залежності від типу та способу побудови спецобчислювача, зокрема можливостей здійснення паралельних обчислень. Кількість ПРПлК визначається його ресурсами та може становити від декількох десятків до декількох сотень [19]. Залежно від обраних типів АПрК та спецобчислювача реалізується відповідний спосіб введення цифрових відліків основного сигналу, вигляд та спосіб введення сигналу ОК від ГОК.

Для дослідження параметрів та показників якості функціонування програмно визначеного квазидоплерівського радіопеленгатора скористаємося відомими теоретичними підходами. Так, максимальне значення доплерівського зсуву частот, викликаного комутацією антен, визначатиметься за виразом [2]:

$$F_{D,max} = f_S \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot f_{rot}}{c}, \quad (2)$$

де f_S – радіочастота сигналу, r – радіус антенної системи, f_{rot} – частота комутації антенних елементів, c – швидкість світла.

При постійному r , що визначається жорсткою конструкцією антени, вираз (2) встановлює залежність між частотою комутації антенних елементів f_{rot} та спричиненим нею значенням $F_{D,max}$. Збільшення $F_{D,max}$ повинно спричинити підвищення відношення сигнал/шум¹ на вході ФД та, відповідно, до покращення точності пеленгування. Збільшення частоти f_{rot} приводить до підвищення швидкодії, оскільки тривалість одного циклу сканування

$$t_{scan} = \frac{1}{f_{rot}}. \quad (3)$$

У апаратних реалізаціях квазидоплерівських пеленгаторів частота $F_{D,max}$ обмежена зверху смугою пропускання радіоприймального тракту, а частота комутації f_{rot} обмежується можливостями апаратної реалізації високодобрих СФ, що стоять між ЧД та ФД (рис. 1). На практиці обирають $F_{D,max}=300..700$ Гц, а $f_{rot}=170..500$ Гц [2, 4], обмежуючи сферу застосування та показники якості квазидоплерівських пеленгаторів. Програмна реалізація ПРПлК накладає менш жорсткі обмеження на $F_{D,max}$ та f_{rot} . Так, $F_{D,max}$ може перевищувати ширину спектру сигналу та частково перекривати спектри сусідніх сигналів (рис. 3).

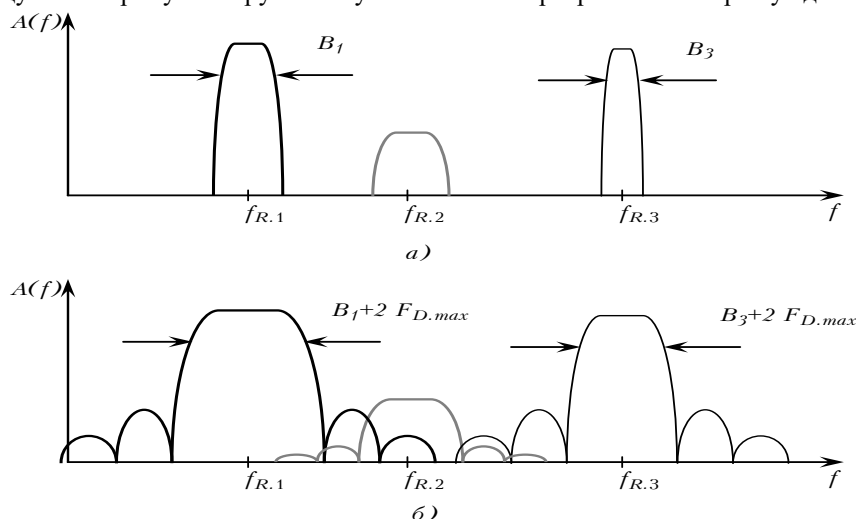


Рис. 3. Перетворення спектрів сигналів у квазидоплерівському пеленгаторі: до перетворення (а), та після (б)

¹ Під терміном «сигнал» тут мається на увазі закон зміни у часі доплерівського зсуву частот, спричиненого комутацією антен, а під терміном «шум» – закон зміни миттєвої частоти сигнально-завадової суміші. Опис прямої залежності точності пеленгування від $F_{D,max}$ у літературі відсутній

У випадку реалізації декількох ПРПлК ($N > 1$) частота $F_{D,max}$ обмежуватиметься значенням роздільної здатності за частотою:

$$F_{D,max} < \min_{\substack{i=1..N \\ j=1..N \\ i \neq j}} (f_{R,i} - f_{R,j}). \quad (4)$$

Для одного ПРПлК ($N=1$) $F_{D,max}$ не повинна перевищувати половину смуги пропускання АПрК:

$$F_{D,max} < \frac{B}{2}. \quad (5)$$

Значення B для більшості відомих зразків АПрК лежить у межах 1..30 МГц [3].

У випадку програмної реалізації ПРПлК частота f_{rot} обмежується знизу мінімальним значенням $F_{D,max}$ для забезпечення необхідної точності пеленгування та максимальною тривалістю одного циклу сканування, а зверху – можливостями ГОК та схеми комутації антен. Практично f_{rot} можна обрати у діапазоні 500...5000 Гц, забезпечуючи $t_{scan}=0,2..2$ мс. Це дає можливість пеленгування короткотривалих сигналів (у апаратних реалізаціях квазідоплерівських пеленгаторів така можливість взагалі не розглядається), або реалізації алгоритмів статистичного згладжування для підвищення точності отримуваних результатів.

Розробка функціональної схеми програмно визначеного квазідоплерівського радіопеленгатора, архітектури СПЗ та їх практична реалізація повинна здійснюватись у відповідності до початкових умов та вимог. Так, необхідно реалізувати програмно визначений квазідоплерівський радіопеленгатор для частотного діапазону 420-500 МГц та сигналів із шириною спектру 12..35 кГц. До таких належать більшість сигналів аналогових та цифрових мобільних телекомунікаційних систем (професійне мобільне радіо).

Враховуючи відмічене пропонується у якості АПрК обрати відомий цифровий приймач RTL SDR, побудований на базі мікросхем цифрового тюнера R820T та контролера RT2832 [3]. Перевагами цього приймача є невелика вартість, зручність у застосуванні та характеристики, достатні для перевірки запропонованих схемних та програмно-алгоритмічних рішень. У якості спецобчислювача пропонується обрати ПЕОМ, що забезпечує максимальну гнучкість реалізації та зручність розробки та відлагоджування СПЗ.

Запропоновану функціональну схему апаратної частини програмно визначеного квазідоплерівського радіопеленгатора наведено на рисунку 4. До її складу входять: АС, АК, АПрК RTL SDR, ГОК на базі мікроконтролера (МК) та ПЕОМ. Для спрощення реалізації задіяно чотири антенних елемента, розташовані по колу.

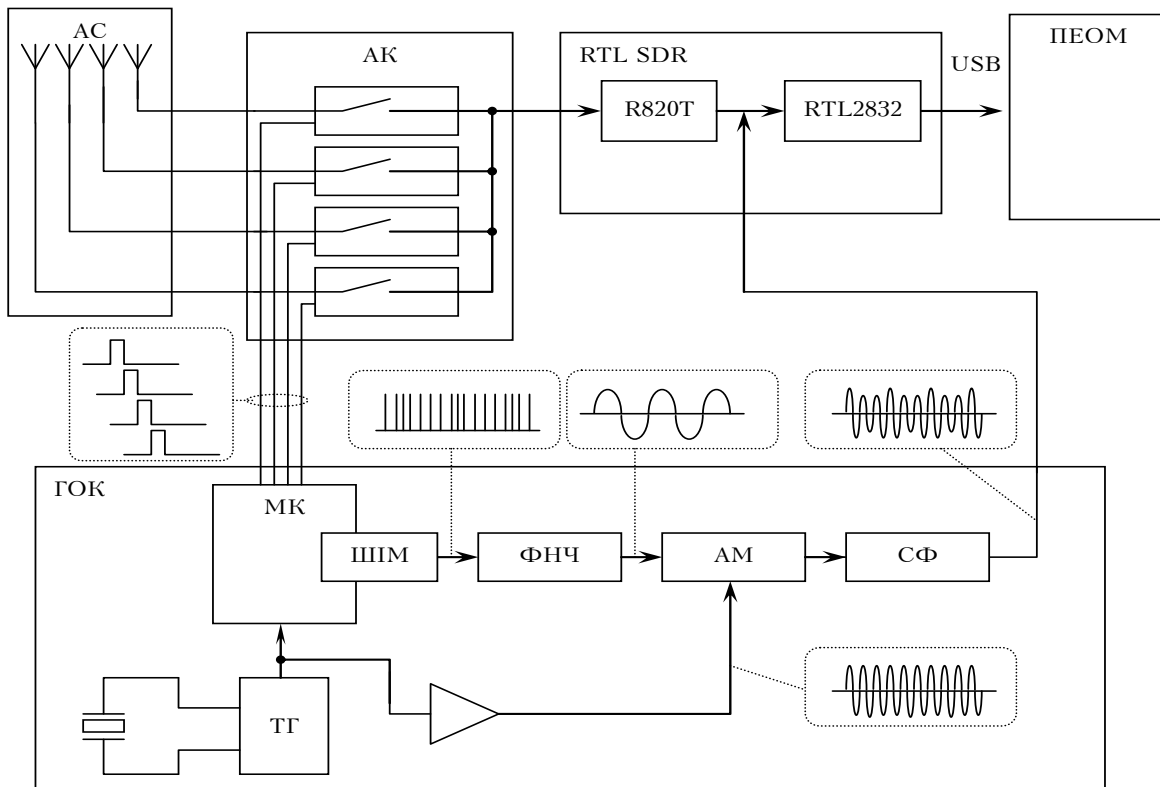


Рис. 4. Функціональна схема апаратної частини програмно визначеного квазідоплерівського радіопеленгатора на базі цифрового приймача RTL SDR

Радіоприймальна частина схеми (рис. 4) у складі АС, АК та АПрК RTL SDR працює за класичними підходами [7, 9, 8, 15, 5] та додаткових пояснень не потребує. Натомість, увагу слід приділити особливостям побудови та функціонування ГОК. За допомогою МК формуються імпульси для послідовної комутації антен та подаються до АК. Синхронно із ними за допомогою широтно імпульсного модулятора (ШИМ), що входить до складу МК, та фільтра низьких частот (ФНЧ) формується гармонічний сигнал синфазний із імпульсами комутації антен. Саме він і є опорним коливанням, яке необхідно ввести до ПЕОМ, забезпечивши вказану вище синфазність, та використати у програмній частині для розрахунку пеленга на ДРВ. Для цього у запропонованій функціональній схемі реалізовано оригінальне схемотехнічне рішення.

Річ у тому, що після АЦП, яке у даній схемі здійснюється контролером RT2832, відліки сигналу групуються у пакети, а всі операції здійснюються в асинхронному режимі. Стек цифрових інтерфейсів (у тому числі USB), відповідні драйвери ПЕОМ, операційна система та саме СПЗ вносять часові затримки, врахувати та компенсувати які неможливо.

У зв'язку із цим пропонується ОК вводити до ПЕОМ тим же шляхом, що і основний сигнал, використовуючи принцип частотного рознесення. Для цього ОК за допомогою амплітудного модулятора (АМ) та смугового фільтра (СФ) перетворюється в амплітудно модульоване коливання, підмішується до основного сигналу проміжної частоти (ПЧ) з виходу цифрового тюнера R820T та подається на вхід АЦП контролера RT2832. Приблизний вигляд амплітудно-частотного спектру ПЧ на вході АЦП наведено на рисунку 5.



Рис. 5. Приблизний вигляд амплітудно-частотного спектру ПЧ на вході АЦП

Амплітудну модуляцію сигналу ОК обрано через мінімальну ширину спектру порівняно з іншими видами модуляції [3]. Значення несучої частоти $f_{H.ОК}$ слід обирати таким чином, щоб АМ сигнал ОК знаходився у зоні значних спотворень АЧХ АЦП, де приймати основні сигнали недоцільно. Для спрощення конструкції функціональною схемою (рис. 4) передбачено використання одного тактового генератора (ТГ) для роботи МК та генерування АМ сигналу ОК.

Наступним етапом є розробка архітектури СПЗ та реалізація операцій програмно визначеного квазідоплерівського радіопеленгатора. Враховуючи основні принципи ПВР [1, 7], а також відмічені вище операції, які необхідно реалізувати для обчислення пеленгу на ДРВ, пропонується архітектура СПЗ програмно визначеного квазідоплерівського радіопеленгатора, наведена на рис. 6. Для простоти наведено архітектуру одного ПРПлК, яких у складі СПЗ може бути декілька.

На рисунку 6 подвійні лінії означають квадратурні складові комплексного сигналу. Всі складові архітектури – програмно реалізовані модулі, які здійснюють відповідні операції цифрової обробки сигналу [1, 7, 3]. Як видно із рис. 6, ПРПлК квазідоплерівського радіопеленгатора містить два програмних приймальних канали. На вхід кожного із них надходить оцифрований груповий сигнал з АЦП, який являє собою суміш групового сигналу ПЧ та амплітудно модульованого ОК (рис. 5).

Перший програмний приймальний канал (верхня гілка на рис. 6) у складі комплексного генератора з частотою $-f_{R,i}$, комплексного перемножувача, ФНЧ, ЧД, СФ, перетворювача Гільберта (ПГ) та обчислювача аргумента комплексного числа призначений для виділення абсолютної фази гармонічного коливання доплерівського зсуву частот, спричиненого комутацією антен.

Другий програмний приймальний канал (нижня гілка на рис. 6) у складі комплексного генератора з частотою $-f_{H.ОК}$, комплексного перемножувача, ФНЧ, амплітудного детектора (АД), генератора з колом фазового автоматичного підстроювання частота (ГФАПЧ) та обчислювача аргумента комплексного числа призначений для виділення абсолютної фази гармонічного ОК.

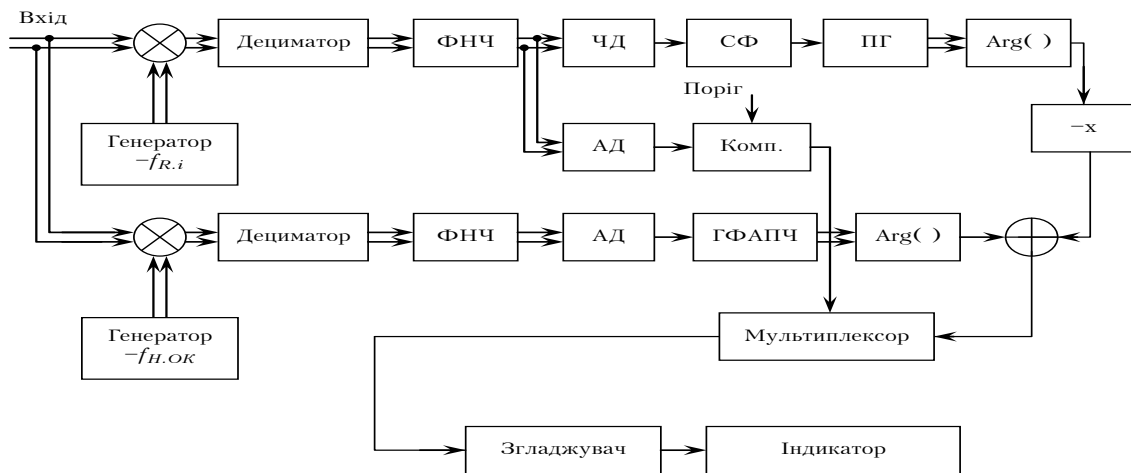


Рис. 6. Архітектура спеціалізованого програмного забезпечення програмно визначеного квазідоплерівського радіопеленгатора

Далі отримані фази віднімаються, згладжуються за період комутації та відображаються користувачу на екрані у вигляді пеленгу на ДРВ. Особливу увагу слід приділити процедурі згладжування різниці абсолютних фаз комплексних гармонік. Річ у тім, що область значень фази як обчисленого аргумента комплексного числа становить $(-\pi .. \pi)$, а залежність фази від часу може мати розриви. Згладжування вимірів фази за допомогою ФНЧ можливе лише у випадках відсутності таких розривів, тобто коли значення коливаються поблизу нуля. Існують підходи до виявлення та компенсації розривів фази (Phase Unwrapping, або обчислення розгорнутої фази) [17], проте вони працюють лише за відсутності фазових шумів та не можуть бути застосовані у даному випадку.

Для згладжування вимірів фази (пеленгу на ДРВ) програмно визначеного квазідоплерівського радіопеленгатора запропоновано процедуру аперіодичної фільтрації. Її суть полягає у штучному приведенні значення фази до середини області значень, проведенні фільтрації та "поверненні" результату до попереднього діапазону області значень.

Гілка у складі АД, компаратора та мультиплексора забезпечує спрацювання схеми обчислення пеленгу лише у випадку перевищення певного порогового рівня, що відповідає наявності корисного сигналу. Саме ця гілка забезпечує автоматичне виявлення та радіопеленгування короткотривалих сигналів. Для експериментальної перевірки запропонованих у статті схемотехнічних та програмно-алгоритмічних рішень розроблено дослідний зразок програмно визначеного квазідоплерівського радіопеленгатора. Його апаратна частина побудована у відповідності до запропонованих структурної та функціональної схем (рис. 2 та 4). Вигляд розробленого дослідного зразка наведено на рисунку 7.

Прототип СПЗ пеленгатора розроблено у відповідності до запропонованої архітектури (рис. 6) та принципів багатосмугового ПВР [19, 5]. Віконний інтерфейс розробленого прототипу СПЗ наведено на рисунку 8. На рисунку добре видно спектр ОК, підмішаного до групового сигналу, та спектри чотирьох сигналів, для яких реалізовано ПРПЛК. Розроблений дослідний зразок програмно визначеного квазідоплерівського радіопеленгатора дозволив експериментально підтвердити правильність отриманих рішень.

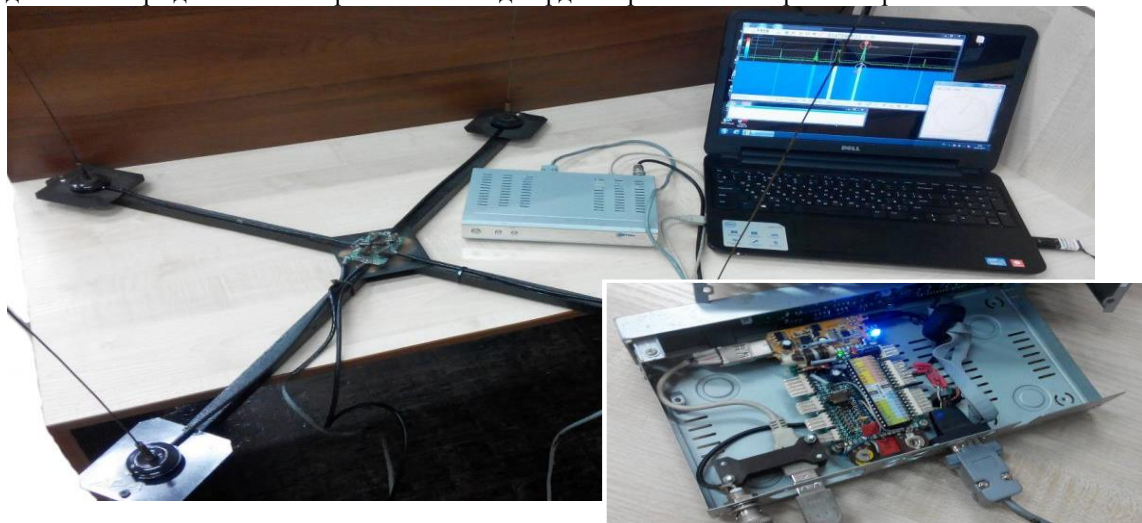


Рис. 7. Дослідний зразок програмно визначеного квазідоплерівського радіопеленгатора

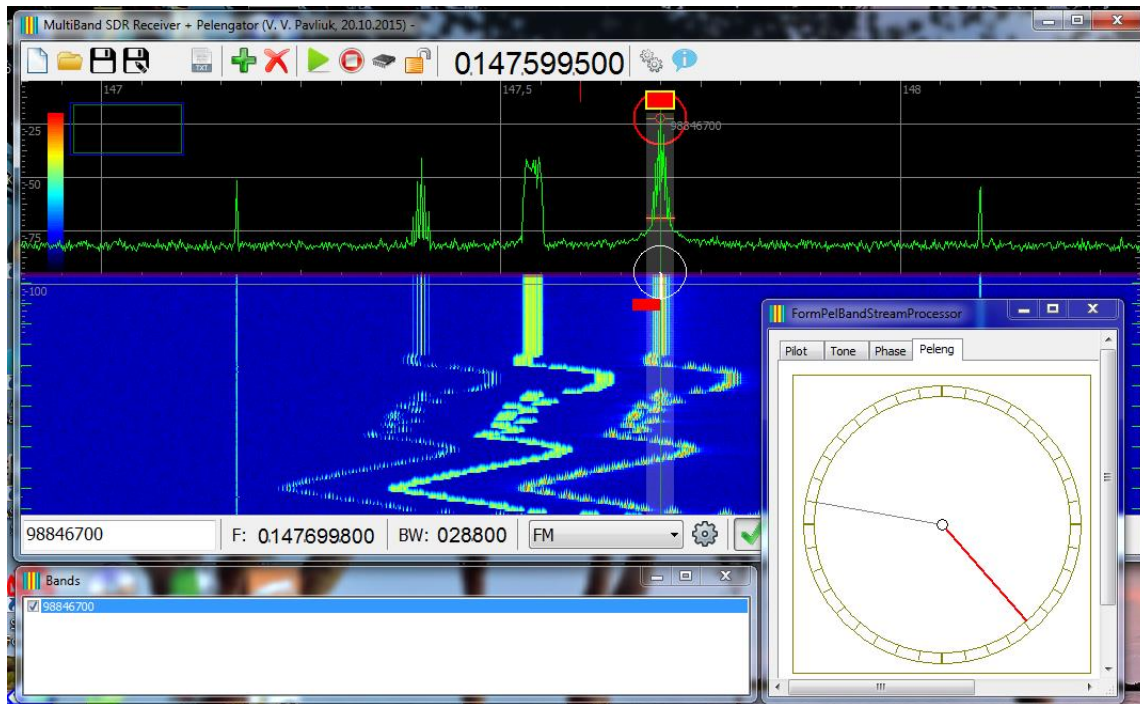


Рис. 8. Віконний інтерфейс прототипу СПЗ програмно визначеного квазидоплерівського радіопеленгатора

Побудова квазидоплерівського радіопеленгатора за технологією ПВП підтверджує такі ключові особливості у порівнянні із класичною реалізацією:

можливість пеленгування короткотривалих сигналів та реалізації алгоритмів статистичного згладжування для підвищення точності отримуваних результатів;

можливість пеленгування декількох (враховуючи можливості АПрК RTL SDR та ресурси ПЕОМ – до 20) частотних каналів одночасно;

суттєве спрощення обробки радіопеленгаційної інформації, можливість її реалізації на тій же ПЕОМ, де розгорнуто СПЗ пеленгатора, та незначне підвищення складності апаратної частини.

Висновки. В результаті проведених досліджень розроблено нові схемотехнічні та програмно-алгоритмічні рішення щодо побудови і реалізації автоматичних квазидоплерівських радіопеленгаторів на базі технології програмно визначеного радіо. Запропоновано структурну схему автоматичного програмно визначеного квазидоплерівського пеленгатора, функціональну схему апаратної частини та архітектуру спеціалізованого програмного забезпечення. Реалізовано згладжування вимірів пеленгу за допомогою процедури аперіодичної фільтрації з урахуванням розривів фази. Підтверджено потенційні переваги реалізації квазидоплерівського радіопеленгатора за технологією програмно визначеного радіо у порівнянні із класичною реалізацією, головними із яких є можливість пеленгування короткотривалих сигналів та одночасна робота декількох частотно рознесених програмно визначених радіопеленгаційних каналів. Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні квазидоплерівського методу радіопеленгування за рахунок застосування технології програмно визначеного радіо та розробці нових алгоритмів обробки радіопеленгаційної інформації. Напрямами подальших досліджень є знаходження прямої залежності точності пеленгування від максимальної девіації доплерівської частоти.

Список використаної літератури:

1. *Bard J.* Software Defined Radio The Software Communications Architecture / *J.Bard, V.J. Kovarik* // John Wiley & Sons Ltd. – 2007. – 439 p.
2. *Kossor M.* (WA2EBY) A Doppler Radio-Direction Finder. Part 1, 2 / *M.Kossor* // QST. – 1999. – pp. 35–40. – Режим доступу : <https://archive.org/details/ADopplerRadioDirectionFinder>.
3. List of software-defined radios // Wikipedia, the free encyclopedia. – Режим доступу : https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_software-defined_radios.
4. Introduction into Theory of Direction Finding // Rohde & Schwarz Radiomonitoring & Radiolocation Catalog 2011 / 2012. – 2012. – Pp. 72–95. – Режим доступу : <http://telekomunikacije.etf.bg.ac.rs/predmeti/ot3tm2/nastava/df.pdf>.
5. *Rajan J.* SDR platform enables reconfigurable direction finding system / *J.Rajan* // RFDesign. – 2005. – P. 36–46. – Режим доступу : http://www.spectrumsignal.com/publications/SDR_in_Direction_Finding_RFDesign_0105.pdf.

6. RasHAWK Distributed EM Situational Awareness Based on Raspberry Pi and REDHAWK AOC Susquehanna Tech Challenge 2013 Final Report. – 2014. – 25 p. – Режим доступу : http://www.geontech.com/download/white_papers/AOC_Challenge_GEON.pdf.
7. Roupheal T.J. RF and Digital Signal Processing for Software-Defined Radio: A Multi-Standard Multi-Mode Approach / T.J. Roupheal. – Burlington, Newnes Inc. – 2009. – 383 p.
8. Seeber B. Software Defined Radio Direction Finding / B. Seeber // Ettus Research. – 2013. – 57 p. – Режим доступу : <http://static1.1.sqspcdn.com/static/f/679473/21303404/1355863220773/seeber-DirectionFinding.pdf>.
9. Synchronized RTL-SDR receivers and direction finding. – Tejeez, 2016.– Режим доступу : https://github.com/tejeez/rtl_coherent.
10. Автоматические радиопеленгаторы семейства «Артикул» с улучшенными техническими характеристиками / А.В. Ашихмин, М.Ю. Власов, В.А. Козьмин, А.М. Рембовский. – Режим доступа : <http://www.ircos.ru/zip/art201102.pdf>.
11. Технические характеристики и особенности построения автоматических радиопеленгаторов семейства «АРТИКУЛ» / А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин, А.М. Рембовский, А.П. Сергиенко // Спецтехника и связь. – 2008. – № 2. – С. 26–35.
12. Ашихмин А.В. Цифровая обработка сигналов в носимой аппаратуре радиоконтроля / А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин, А.В. Поляков // Труды 9-го Международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, 13–16 сентября 2011 г. – Санкт-Петербург. – 2011. – С. XXX. – Режим доступа : <http://www.ircos.ru/zip/art201114.pdf>.
13. Безрук В.М. Совместное обнаружение, пеленгование и распознавание радиоизлучений с учетом неопределенности измерений параметров сигналов / В.М. Безрук, А.В. Чеботов // Системы обработки інформації. – 2009. – Вып. 5 (79). – С. 82–84.
14. Виноградов А.Д. Корреляционно-фазовый способ радиопеленгования с использованием эквидистантных кольцевых антенных решеток / А.Д. Виноградов // Антенны. – 2009. – Вып. 4 (143). – С. 22–34.
15. Дощич О. Любительский пеленгатор / О.Дошич // Український УКХ портал – 2016. – Режим доступу : <http://vhfdx.in.ua/index.php/pub/tech/28-lyubitel-ski-j-pelengator>.
16. Дубровин Н.А. Применение высокочувствительных активных антенн в комплексах пеленгования КВ диапазона / Н.А. Дубровин // Антенны. – 2008. – Вып. 3 (130). – С. 21–25.
17. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / Р.Лайонс ; пер. с англ. – 2-е изд. – М. : ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
18. Системы, комплексы, устройства контроля средств связи [Электронный ресурс]. – Харьков : ООО «НТЦ РТС АН ПРЭ», 2013. – 18 с. – Режим доступа : http://www.ntcrts.com/attachments/Catalog_2013.pdf.
19. Павлюк В.В. Побудова високошвидкісних цифрових дециматорів на основі напівсмугових фільтрів з кінцевою імпульсною характеристикою / В.В. Павлюк, О.А. Нагорнюк, Б.В. Молодецький [Електронний ресурс] // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. пр. – Житомир : ЖВІ. – 2015. – Вып. 12. – С. 60–67. – Режим доступу : www.zvir.zt.ua/images/stories/ZbirnikNP/ZbirnikZHVI_12.pdf.
20. Рембовский А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин. – 2-е изд. – М. : Горячая линия-Телеком. – 2009. – 624 с.
21. Слободянюк П.В. Радиомониторинг: вчера, сегодня, завтра / П.В. Слободянюк, В.Г. Благодарный ; под общ. ред. П.В. Слободянюка. – Прилуки : ООО «Издательство «Аір-Поліграф», 2010. – 296 с.

References:

1. Bard, J. (2007), «Software Defined Radio The Software Communications Architecture», *John Wiley & Sons Ltd*, 439 p.
2. Kossor, M. (1999), «A Doppler Radio-Direction Finder», Part 1, 2, *QST*, pp. 35–40, available at: <https://archive.org/details/ADopplerRadioDirectionFinder>
3. «List of software-defined radios», *Wikipedia, the free encyclopedia*, available at: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_software-defined_radios
4. «Introduction into Theory of Direction Finding» (2012), *Rohde&Schwarz Radiomonitoring&Radiolocation Catalog*, available at: <http://telekomunikacije.etf.bg.ac.rs/predmeti/ot3tm2/nastava/df.pdf>
5. Rajan, J. (2005), «SDR platform enables reconfigurable direction finding system», *RFDesign*, pp. 36–46, available at: http://www.spectrumsignal.com/publications/SDR_in_Direction_Finding_RFDesign_0105.pdf
6. «RasHAWK Distributed EM Situational Awareness Based on Raspberry Pi and REDHAWK AOC Susquehanna Tech Challenge 2013 Final Report» (2014), available at: http://www.geontech.com/download/white_papers/AOC_Challenge_GEON.pdf
7. Roupheal, T.J. (2009), *RF and Digital Signal Processing for Software-Defined Radio: A Multi-Standard Multi-Mode Approach*, Newnes Inc, Burlington, 383 p.
8. Seeber, B. (2013), «Software Defined Radio Direction Finding», *Ettus Research*, available at: <http://static1.1.sqspcdn.com/static/f/679473/21303404/1355863220773/seeber-DirectionFinding.pdf>
9. «Synchronized RTL-SDR receivers and direction finding» (2016), available at: https://github.com/tejeez/rtl_coherent
10. Ashihmin, A.V., Vlasov, M.Ju., Koz'min, V.A. and Rembovskij, A.M., «Avtomaticheskie radiopelengatory semejstva «Artikul» s uluchshennymi tehniceskimi harakteristikami», available at: <http://shhshhshh.ircos.ru/zip/art201102.pdf>

11. Ashihmin, A.V., Koz'min, V.A., Rembovskij, A.M and Sergienko, A.R. (2008), «Tehicheskie karakteristiki i osobennosti postroenija avtomaticheskikh radiopelengatorov semejstva «ARTIKUL»», *Spectehnika i svjaz'*, No. 2, pp. 26–35.
12. Ashihmin, A.V., Koz'min, V.A. and Poljakov, A.V. (2011), «Cifrovaja obrabotka signalov v nosimoj apparature radiokontrolja», *Trudy 9-go Mezhdunarodnogo simpoziuma po jelectromagnitnoj sovmestimosti i jelectromagnitnoj jekologii*, 13–16 sentjabrja, Sankt-Peterburg, pp. XXX, available at: <http://www.ircos.ru/zip/art201114.pdf>
13. Bezruk, V.M. and Chebotov, A.V. (2009), «Sovmestnoe obnaruzhenie, pelengovanie i raspoznavanie radioizluchenij s uchedom neopredelennosti izmerenij parametrov signalov», *Sistemi obrobki informacii*, Vol. 5 (79), pp. 82–84.
14. Vinogradov, A.D. (2009), «Korreljacionno-fazovyj sposob radiopelengovanija s ispol'zovaniem jekvidistantnyh kol'cevnyh antennyh reshetok», *Antenny*, Vol. 4 (143), pp. 22–34.
15. Doshhych, O. (2016), «Ljubitel'skij pelengator», *Ukrai'ns'kyj UKH portal – 2016*, available at: <http://vhfdx.in.ua/index.php/pub/tech/28-lyubitel-skij-pelengator>
16. Dubrovin, H.A. (2008), «Primenenie vysokochuvstvitel'nyh aktivnyh antenn v kompleksah pelengovanija KB diapazona», *Antenny*, Vol. 3 (130), pp. 21–25.
17. Lajons, R. (2006), *Cifrovaja obrabotka signalov*, Translated by English, 2-nd ed., OOO «Binom-Press», Moskva, 656 p.
18. «Sistemy, komplekсы, ustrojstva kontrolja sredstv svjazi», (2013), OOO «NTC RTS AN PRJe», Har'kov, 18 p., available at: http://www.ntcrts.com/attachments/Catalog_2013.pdf
19. Pavljuk, V.V., Nagornjuk, O.A. and Molodec'kij, B.V. (2015), «Pobudova visokoshvidkisnih cifrovih decimatoriv na osnovi napivsmugovih fil'triv z kincevoju impul'snoju karakteristikoju», *Problemi stvorennja, viprobuvannja, zastosuvannja ta ekspluatacii skladnih informacijnih sistem*, zbirnik naukovih prac', ZhVI, Zhitomir, Vol. 12, pp. 60–67, available at: www.zvir.zt.ua/images/stories/ZbirnikNP/ZbirnikZHVI_12.pdf
20. Rembovskij, A.M., Ashihmin, A.V. and Koz'min, V.A. (2009), *Radiomonitoring: zadachi, metody, sredstva*, 2nd ed., Gorjachaja linija-Telekom, Moskva, 624 p.
21. Slobodjanjuk, P.V. and Blagodarnyj, V.G. (2010), *Radiomonitoring: vchera, segodnja, zavtra*, in Slobodjanjuk, P.V. (ed.), OOO «Izdatel'stvo «Air-Poligraf», Priluki, 296 p.

ПАВЛЮК Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник науково-дослідної лабораторії науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- удосконалення блоків та алгоритмів функціонування радіотехнічних систем;
- проектування широкосмугових антенних систем для комплексів радіомоніторингу;
- технічний аналіз та цифрова обробка сигналів систем радіозв'язку.

Телефон: (097) 906–70–89.

E-mail: mailtraktor@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 09.03.2017.