

ГУЛА ІГОР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4434-5794>e-mail: [holmenetwork@gmail.com](mailto:holmenetwork@gmail.com)

ПОЛІКАРОВСЬКИХ ОЛЕКСІЙ

Одеський національний морський університет

<https://orcid.org/0000-0002-1893-7390>e-mail: [polalexey@gmail.com](mailto:polalexey@gmail.com)

## ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОЇ ПЛАТФОРМИ GNU RADIO ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПОШУКОВОГО АЛГОРИТМУ ПЕЛЕНГАТОРА КОРЕЛЯЦІЙНОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА

Під час розробки сучасної радіоапаратури широкого використання набули програмно-апаратні системи SDR (SDR - Software Defined Radio). Системи SDR, зокрема, використовуються при проектуванні пеленгаторів джерел радіосигналів. Ефективність пеленгування та визначення джерел радіовипромінювання багато в чому визначається технічними характеристиками обладнання. Стаття присвячена розгляду питання використання програмної платформи GNU RADIO для реалізації пошукового алгоритму пеленгатора кореляційного інтерферометра.

Ключові слова: алгоритм кореляційного інтерферометра, система SDR, GNU RADIO.

HULA IHOR

Khmelnytsky National University

POLIKAROVSKYKH OLEKSIY

Odessa National Maritime University

### USING THE GNU RADIO SOFTWARE PLATFORM FOR THE IMPLEMENTATION OF THE SEARCH ALGORITHM FOR THE CORRELATION INTERFEROMETER DIRECTOR

During the development of modern radio equipment, software and hardware systems SDR (SDR - Software Defined Radio) became widely used. SDR systems, in particular, are used in the design of direction finders of radio signal sources. The effectiveness of direction finding and determination of radio radiation sources is largely determined technical characteristics of the equipment.

For modern systems for detecting the location of radio radiation sources, direction finders based on a correlation interferometer, which can perform direction finding of almost all types of radio signals, are best suited. Such direction finders can recognize broadband modulated signals, simultaneously process and recognize several signals in one frequency channel, both from one source of radio signals (coherent) and from several sources (incoherent). A radio receiver using SDR technology can be programmatically reconfigured with the help of software. Such a radio receiver has a broadband radio frequency part with a large dynamic range, a high-speed ADC path, a powerful signal processor and a specialized digital filtering path. SDR receivers can receive signals of various standards and frequencies, the choice of which depends on specific tasks.

The most flexible current software platform for SDR systems is the open source software platform GNU RADIO. The article is devoted to consideration of the issue of using the GNU RADIO software platform to implement the search algorithm of the direction finder of the correlation interferometer. The Ettus USRP N210 SDR platform was chosen to implement the direction finder using the correlation interferometer algorithm.

In this study, a two-channel software-controlled model of the direction finder, which works according to the correlation interferometer algorithm, was proposed. As a result of measuring the placement angle sources of radio signals, the individual absolute error was about 2 to 4 degrees, while the average absolute error was about 3 degrees. This result is quite good for such mobile phones two-channel systems. Systems with 4 or more channels have higher accuracy, but they have much lower economic profitability.

Keywords: correlation interferometer algorithm, SDR system, GNU RADIO.

#### Постановка задачі

Радіопеленгатори відносяться до навігаційного обладнання, основна задача радіопеленгаторів визначення положення об'єкту який рухається у просторі. З поширенням супутникових позиційних радіотехнічних систем, пеленгація для задач радіонавігації має все менше використання. Проте, радіопеленгація досить актуальна для задач радіоконтролю та виявлення місцезнаходження джерел радіовипромінювання. Задача ефективного пеленгування джерел радіовипромінювання в великій мірі залежить від технічних характеристик обладнання. Поширена структура сучасного пеленгатора показана на рис. 1[1].

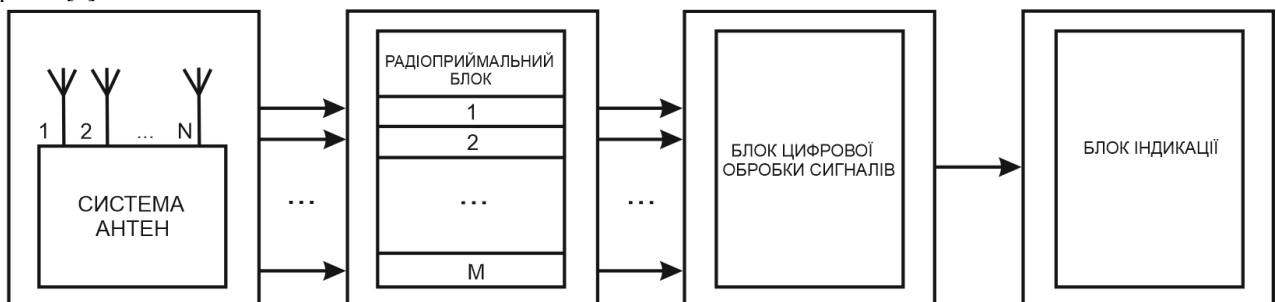


Рисунок 1. Структурна схема радіопеленгатора

Структурна схема радіопеленгатора представлена на рис.1 складається із наступних блоків: блоку антен, радіоприймального блоку, блоку цифрової обробки сигналів та блоку індикації. Також в залежності від

поставлених вимог, до структурної схеми можна додати наступні блоки: блок дистанційного керування по лініям зв'язку або радіоканалу; навігаційний блок – для орієнтації радіопеленгатора; блок для тестування працездатності пеленгатора; прилади для налаштування і калібрування радіоприймальних трактів.

Система антен пеленгатора складається з  $N$  антен, які розміщені в просторі за певним законом: по еліпсу або по колу, можливі інші варіанти. В якості антен для пеленгатора можуть бути використанні антени різних конструкцій: спрямовані антени різних типів, рамкові антени, конічні вібратори, диско-конусні антени та інші [2, 11, 14].

Радіоприймальний блок використовується для вибору, підсилення та перетворення частоти вхідних сигналів. З виходу радіоприймального блоку (рис.1) аналогові сигнали на проміжній частоті поступають на блок цифрової обробки сигналів, де дані сигнали проходять операцію аналогово-цифрового перетворення. Відповідно до методу, який використовується для пеленгування визначається положення азимуту джерел радіовипромінювання. Також пристрій цифрової обробки сигналів може здійснювати спектральний аналіз сигналів, вимірювати їх параметри, здійснювати демодуляцію та декодування інформації. Блок індикації показує результати пеленгування. Часто в якості блока індикації використовують персональний комп'ютер або ноутбук. Комп'ютер також використовується для керування роботою пеленгаційного обладнання, зберігання результатів пеленгування і ін.[2].

В даний час для систем виявлення місцезнаходження джерел радіовипромінювання використовують наступні типи радіопеленгаторів: на основі спрямованої антени, що обертається; квазидоплерівські системи; фазові інтерферометри; кореляційні інтерферометри; двоканальні автоматичні пеленгатори [3].

Різні типи пеленгаторів мають свої переваги. Для сучасних систем виявлення місцезнаходження джерел радіовипромінювання найкраще підійдуть пеленгатори на основі кореляційного інтерферометру, що можуть здійснювати пеленгування майже усіх видів радіосигналів. Такі пеленгатори можуть розпізнавати широкосмугові модульовані сигнали, одночасно обробляти і розпізнавати декілька сигналів в одному частотному каналі, як від одного джерела радіосигналів (когерентних), так і від декількох джерел (некогерентних).

#### Виклад основного матеріалу

Основна ідея роботи кореляційного інтерферометру полягає у порівнянні вимірних різниць фаз між елементами решітки антени та різниць фаз опорного (теоретичного) просторового сигналу. Цей опорний сигнал передбачено обчислити аналітично для всіх можливих кутів приходу радіохвилі. Напрямок опорного просторового сигналу, де кореляція з прийнятим сигналом максимальна, вважається кутом приходу радіохвилі [3]. Для систем виявлення місцезнаходження джерел радіовипромінювання найбільш поширеною є схема із двома каналами прийому, яка представлена на рис.2 :

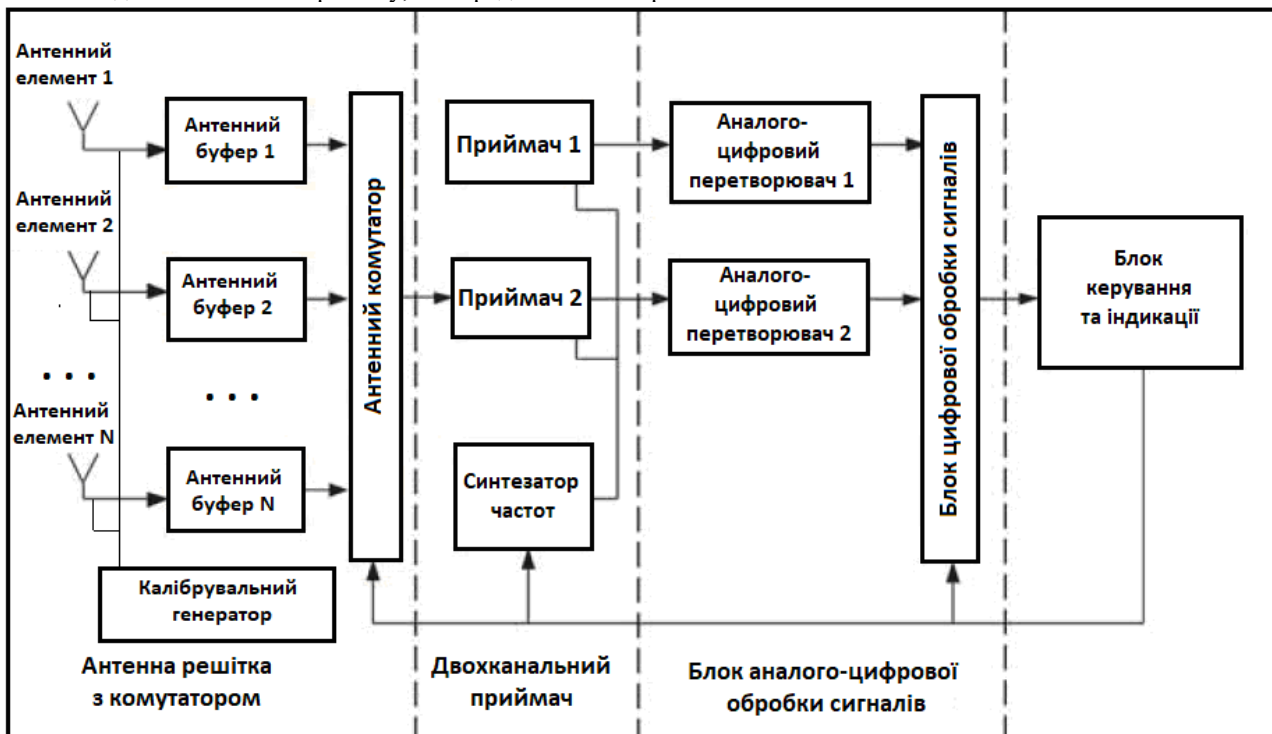


Рисунок 2. Структурна схема кореляційного інтерферометру

У цій схемі, де кількість антенних елементів перевищує кількість каналів прийому, всі елементи послідовно підключаються до входів приймача за допомогою високочастотних комутаторів. Ключові компоненти кореляційного інтерферометру включають антенну решітку, антенний комутатор, двоканальний когерентний приймач і блок аналого-цифрової обробки.

Антенний комутатор послідовно підключає до входів двоканального приймача пари елементів антенної системи, вибрані за алгоритмом пеленгування. Для забезпечення когерентного прийому сигналів на змішувачі обох каналів радіоприймання подається одна і та ж високочастотна напруга, яка формується синтезатором частот. Основними функціями двоканального приймача є перетворення частоти прийнятого радіосигналу і первинна фільтрація по побічним каналах прийому.

Блок аналого-цифрової обробки виконує основні обчислювальні операції згідно з алгоритмом цифрової обробки. Пристрій керування та індикації, включений до складу інтерферометра, виконує функції управління та надає інтерфейс користувача [7].

Алгоритм роботи кореляційного інтерферометра для виявлення місцезнаходження джерел радіовипромінювання наступний. У випадку кільцевої антенної решітки комплексну амплітуду представимо у вигляді [1, 2]:

$$\dot{E}_n = E_0 \exp \left[ j \left( 2\pi \frac{R_n}{\lambda} \cos(\theta_0 - \alpha_n) \sin \beta_0 + \varphi(t) + \varphi_0 \right) \right], \quad (1)$$

де  $R_n = |\vec{R}_n|$  – радіус кільця, на якому містяться антенні елементи;  $\alpha_n$  – кут розташування  $n$ -го елемента антенної решітки, який відраховують проти часової стрілки від вісі  $x$ . Накладання радіосигналів від різних джерел радіовипромінювання приймається елементами антенної решітки та надходить на входи антенного комутатора, який пропускає на два входи панорамного приймача сигнали з вибраної пари антенних решіток. Ті радіосигнали, що надійшли на входи приймача, переносяться в приймачі на проміжну частоту.

В панорамного приймача смуга частот одночасного огляду значно перевищує ширину спектра сигналу окремого джерела радіовипромінювання. Отже, в смузі частот, яку приймає приймач, може одночасно працювати велика кількість радіоканалів, як показано на рис.3. Сигнали в цих каналах можуть мати різну ширину спектру і відноситись до різних класів випромінювання.



Рисунок 3. Спектри радіосигналів, які одночасно приймає панорамний приймач [3]

З пари виходів приймача сигнали проміжної частоти потрапляють на входи АЦП, де вони синхронно перетворюються в цифрові сигнали, довжиною  $N_{\Pi}$  відліків. За допомогою дискретного перетворення Фур'є, для кожного сигналу отримуємо по  $N_{\Pi}$  комплексних спектральних відліків. В подальшому для спрощення розрахунків використовують тільки  $N_{\Pi} / 2$  комплексних відліків кожного спектру. Спектр сигналу в  $k$ -му радіоканалі відповідає сигналу  $k$ -го джерела радіовипромінювання [2]. Враховуючи співвідношення:

$$E = U / h_D, \quad (2)$$

де  $E$  – напруженість електромагнітного поля;  $U$  – напруга на виході антени;  $h_D$  – дійсна довжина вимірювальної антени, комплексні амплітуди сигналу в  $k$ -му радіоканалі для сигнального  $Z_c(n_1, t)$  і опорного  $Z_0(n_2, t)$  трактів мають наступний вигляд:

$$Z_c(n_1, t) = h_D E_0 K \sin \beta_0 \times \exp \left[ j \left( 2\pi \frac{R_{n1}}{\lambda} \cos(\theta_0 - \alpha_{n1}) \sin \beta_0 + \varphi(t) + \varphi_0 + \varphi \right) \right]; \quad (3)$$

$$Z_0(n_2, t) = h_D E_0 K' \sin \beta_0 \times \exp \left[ j \left( 2\pi \frac{R_{n2}}{\lambda} \cos(\theta_0 - \alpha_{n2}) \sin \beta_0 + \varphi(t) + \varphi_0 + \varphi' \right) \right], \quad (4)$$

де  $h_D$  – дійсна висота антенного елемента для  $k$ -го радіоканалу, яка підключена до входу приймача;  $E_0$  – амплітуда напруженості електромагнітного поля радіосигналу в  $k$ -му радіоканалі;  $K, K', \varphi, \varphi'$  – коефіцієнти підсилення і фазові затримки сигналу сигнального і опорного трактів приймача відповідно для  $k$ -го радіоканалу;  $n_1, n_2$  – номери елементів антенної решітки,  $n_1 \neq n_2$ ;  $\alpha_{n1}, \alpha_{n2}$  – кути положень елементів антенної решітки. В наслідок виконання операції виявлення відомі значення центральних частот радіоканалів  $f_k$  в смузі одночасного аналізу  $df$  і ширина радіоканалу  $dF$ . Апаратною реалізацією визначається смуга аналізу

$df$ . Значення номерів радіоканалів  $\{k\}$ ,  $1 \leq k \leq k_{\max}$ ,  $k_{\max} = df / dF$ , в яких виявленні радіосигнали, запам'ятовуються.

Кожному з цих номерів відповідають значення границь радіоканалу, перелічені в номери компонент спектру з урахуванням смуги аналізу  $df$ , об'єму  $N_{II}$  і ширини радіоканалу  $dF$ . Привласнюючи складовим спектру радіоканалу порядкові номери, отримують послідовності номерів відліків спектру, які відповідають частотним смугам радіоканалів [1, 2, 7].

Для радіоканалів в яких виявлений сигнал, перемножують комплексні відліки спектру сигналу сигнального тракту  $S_c(k, i, n_1)$  з комплексно пов'язаними відліками спектру сигналу опорного тракту  $S_0(k, i, n_2)$ , отриманні добутки складають:

$$\dot{A}_{n_1, n_2} = \sum_i \dot{S}_c(k, i, n_1) \dot{S}_0(k, i, n_2) \quad (5)$$

де  $\kappa$  – номер радіоканалу,  $1 \leq \kappa \leq k_{\max}$ ;  $i$  – номер відліку спектру в каналі,  $i = 0, 1, \dots, q-1$ . В результаті підсумовування добутків однойменних спектральних відліків для  $k$ -го радіоканалу формується спектральна складова, яка відповідає не модульованій несучій частоті радіосигналу. З урахуванням виразів (3), (4), (5) отримуємо інтерференційний вектор сигналу:

$$\dot{A}_{n_1, n_2} = (hE_0 \sin \beta_0)^2 KK' \exp \left[ j \left( \Delta \Phi_{n_1, n_2} + \varphi - \varphi' \right) \right], \quad (6)$$

де фазовий зсув

$$\Delta \Phi_{n_1, n_2} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ R_{n_1} \cos(\theta_0 - \alpha_{n_1}) - R_{n_2} \cos(\theta_0 - \alpha_{n_2}) \right] \sin \beta_0. \quad (7)$$

Величини фазових зсувів  $\Delta \Phi_{n_1, n_2}$  залежать від напрямку приходу радіосигналу, від кута  $\gamma_{n_1, n_2}$  орієнтації пеленгаційних пар і від бази  $b_{n_1, n_2}$  між  $n_1$ -м і  $n_2$ -м антенними елементами.

Для забезпечення точності вимірювань необхідною умовою є забезпечення ідентичності комплексних коефіцієнтів передачі радіоприймальних каналів. На сучасному етапі розвитку електроніки побудова широкопasmового двоканального радіоприймального пристрою с однаковими коефіцієнтами передачі радіоприймальних каналів є досить складним технічним завданням. У зв'язку з цим доцільно використовувати в пеленгаторі на основі алгоритму кореляційного інтерферометра двоканальний радіоприймальний пристрій з сигнальними і опорними каналами і з загальним гетеродином.

Для реалізації пошукового алгоритму пеленгатора кореляційного інтерферометра запропоновано використання системи SDR з програмним середовищем GNU RADIO. Радіоприймач, що використовує технологію SDR за допомогою програмного забезпечення може бути програмно переконфігурований. Такий радіоприймач має над широкопasmову радіочастотну частину з великим динамічним діапазоном, високошвидкісний тракт АЦП, має потужний сигнальний процесор та спеціалізований цифровий тракт фільтрації. Приймачі SDR можуть приймати сигнали різних стандартів та частот, вибір яких залежить від конкретних задач [1, 6, 12].

Найгнучкішою сучасною програмною платформою для систем SDR є програмна платформа з відкритим кодом GNU RADIO. Схеми пристроїв в програмному середовищі GNU RADIO будуються з блоків. Блок являє собою елементарну одиницю обробки сигналів, так званий, "чорний ящик", який має декілька входів і виходів. З'єднуючи однотипні виходи і входи різних блоків будуються блок-схеми пристроїв. Ми можемо з'єднувати блоки, як програмно (на Python, C++) так і в графічному редакторі GNURadio companion. В GNURadio на C++ реалізований алгоритм обробки сигналів всередині блоку з використанням для блоків обв'язки на мові Python [1]. Основними блоками у GNU RADIO є блоки джерел сигналів, блоки споживачів та проміжні блоки. Джерелами сигналів можуть виступати, наприклад, програмні генератори сигналів, вхідні інтерфейси звукових карт, файли із записаною інформацією та інші. У якості споживачів блоки програмних аналізаторів спектру, вихідні інтерфейси звукових карт, програмні осцилографи та інші. Проміжні блоки (фільтри, детектори і інші). Програмний інтерфейс GNU RADIO має велику бібліотеку графічних віджетів у вигляді блоків. Є блоки за допомогою яких можна розділити обробку сигналу на декілька робочих ПК [10, 11].

Для реалізації пеленгатора з використанням алгоритму кореляційного інтерферометра вибрано SDR-платформу компанії Ettus USRP N210 [4, 9, 13, 14]. Оскільки USRP N210 створений для використання з такими програмними платформами, як GNU Radio, LabVIEW і Simulink. Для перевірки запропонованої реалізації використовувався, як джерело радіосигналу радіопередавач, що був налаштований на генерування не модульованого синусоїдального сигналу на частоті 433 МГц. Дана частота потрапляє у частотний діапазон приладу USRP N210. Для виявлення сформованого сигналу, обидва канали USRP N210 налаштовані на значення центральної частоти 433 МГц. Антени розташовані на відстані 35 см, що відповідає половині довжини хвилі. Запропонована система складається з SDR-платформи USRP N210 до двох каналів якої підключені антени Вівальді [4, 5], ноутбука з встановленою програмною платформою GNU RADIO, та радіочастотного передавача. Структурна схема тестового пеленгатора показана на рис. 4:

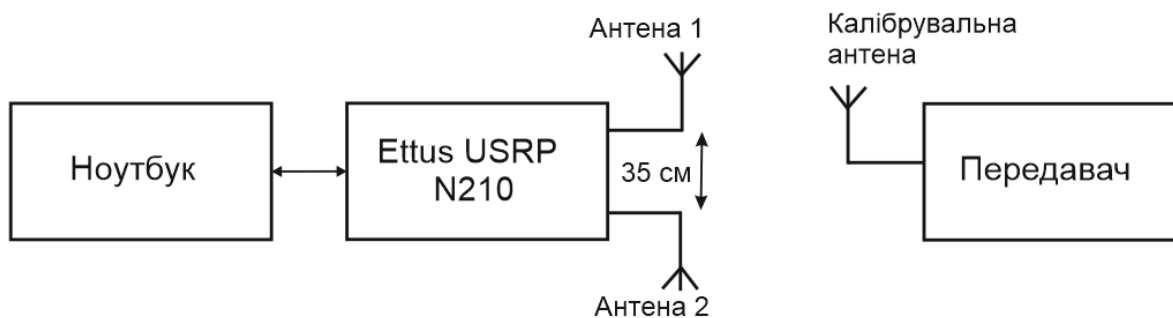


Рисунок 4. Структурна схема пеленгатора на платформі USRP N210

У таблиці 1 представлені значення абсолютної та відносної похибок вимірювання кута розміщення джерела радіосигналів, визначення абсолютної та відносної похибок виконувалось за формулами:

$$\Delta = |\varphi_{вим} - \varphi_{дійс}|, \tag{8}$$

де  $\varphi_{вим}$  – виміряний кут розміщення джерела, градуси;  $\varphi_{дійс}$  - дійсний кут розміщення джерела, градуси.

$$\varepsilon = \frac{|\varphi_{вим} - \varphi_{дійс}|}{\varphi_{дійс}} * 100\%. \tag{9}$$

Таблиця 1

Значення абсолютної та відносної похибок вимірювання кута розміщення джерела радіосигналів

Дійсний кут, градуси	Виміряний кут, градуси	Абсолютна похибка, градуси	Відносна похибка, %
-90	-92,6	2,6	2,89%
-75	-78,8	3,8	5,07%
-60	-62,59	2,59	4,32%
-45	-47,37	2,37	5,27%
-30	-33,86	3,86	12,87%
-20	-23,52	3,52	17,60%
-15	-18,67	3,67	24,47%
-10	-13,84	3,84	38,40%
10	7,49	2,51	25,10%
15	17,59	2,59	17,27%
20	23,34	3,34	16,70%
30	32,78	2,78	9,27%
45	46,94	1,94	4,31%
60	57,53	2,47	4,12%
75	77,47	2,47	3,29%
90	93,54	3,54	3,93%

На рисунку 5 показана програмна реалізація пеленгатора з використанням алгоритму кореляційного інтерферометра в середовищі GNU RADIO. Програмна модель пеленгатора складається із наступних блоків: блоку приймача SDR (SDR Source), двох блоків проріджуючих KIX-фільтрів (Decimating FIR Filter), двох блоків перетворювачів потоку в вектор (Stream to Vector), блоку графічного інтерфейсу в частотній області (QT GUI Frequency Sink), блоку кореляційного інтерферометра (Cross Correlator), блоку перетворювача вектора в потік (Vector to Stream), блоку графічного інтерфейсу в часовій області (QT GUI Time Sink).

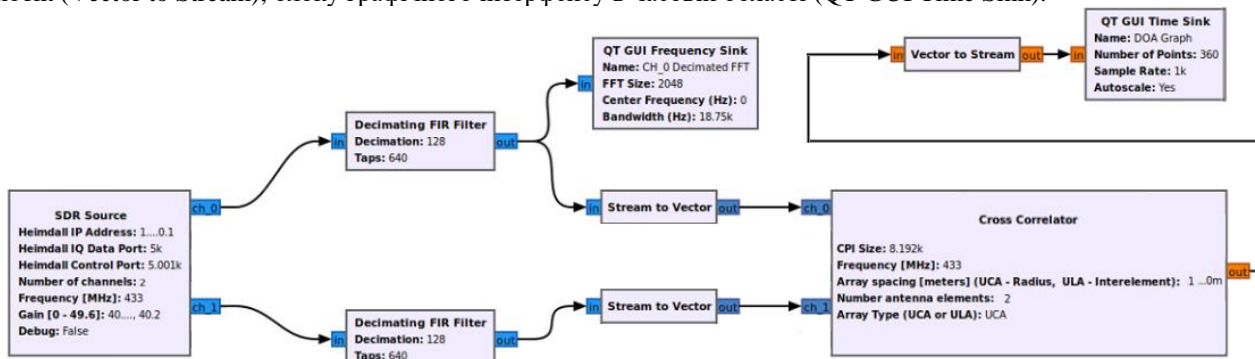


Рисунок 5. Програмна модель пеленгатора з використанням алгоритму кореляційного інтерферометра

Результати вимірювання кута розміщення джерела радіосигналів показані на рис. 6, калібрувальне джерело було розміщеним на різних кутах від -90 до 90 градусів:

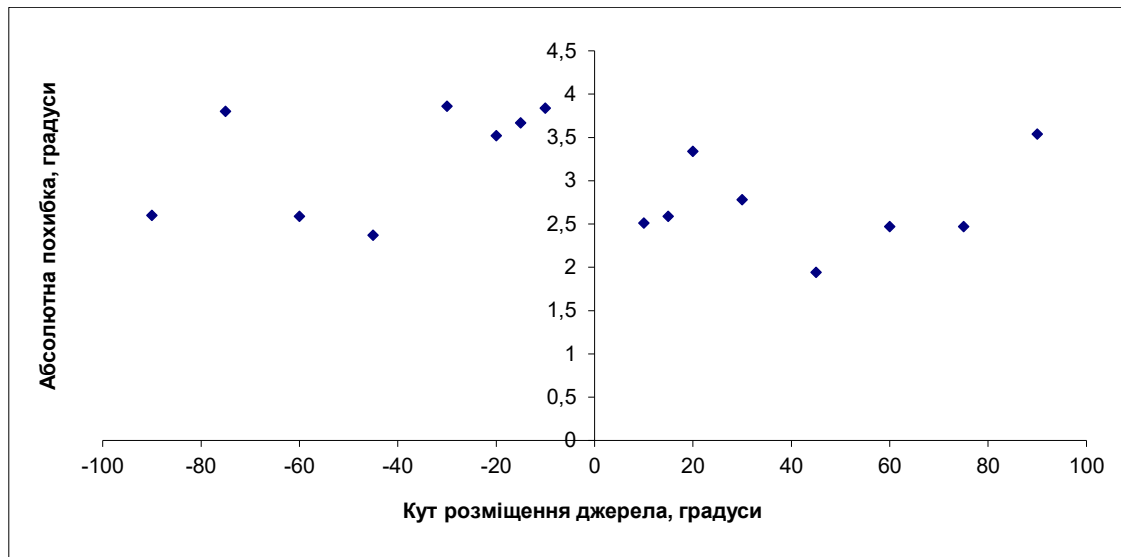


Рисунок 6. Графік залежності абсолютної похибки від кута розміщення джерела радіовипромінювання

### Висновки

У цій роботі була запропонована двоканальна програмно керована модель пеленгатора за методом кореляційного інтерферометра. В результаті проведення вимірювання кута розміщення джерела радіосигналів окрема абсолютна похибка склала приблизно від 2 до 4 градусів, при цьому середня абсолютна похибка склала приблизно 3 градуси. Даний результат досить хороший для таких мобільних двоканальних систем. Вищу точність мають системи, які мають по 4 та більше каналів, але вони мають значно меншу економічну рентабельність. Підвищити точність даної системи в подальшому, можливо використавши інший тип антени. Наприклад, сучасну антену TCI 643 [15, 16], що має 9 TEM-рупорів з смуговими елементами, що розширюються (подібно до антени Вівальді) або антену фірми R&S ADD197 [17, 18], що має одноканальний приймальний пристрій і перемикач із комутатором та набір фазообертачів.

### Література

1. Design of directional modulation radio [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://apps.dtic.mil/sti/trecms/pdf/AD1126490.pdf>
2. Software defined radio based angle of arrival for firstresponder scenarios [Електронний ресурс] - Режим доступу: [https://etda.libraries.psu.edu/files/final\\_submissions/4961](https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/4961)
3. GNU Radio + USRP2 Implementation of a Single-Carrier Zero-Correlation-Zone CDMA System [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:635222/FULLTEXT01.pdf>
4. Mirel Păun, Răzvan Tamas, Ion Marghescu "A software-defined radio approach for direction finding" U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 77, Iss. 4, pp. 235-244, 2015
5. P.J. Gibson, "The Vivaldi aerial", in Proceedings of the European Microwave Conference, vol. 9, pp. 101–105, 1979.
6. RTL-SDR Technical Support [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://coherent-receiver.com/getting-started#>
7. Direction of Arrival Analysis on a Mobile Platform [Електронний ресурс] - Режим доступу: [https://www.gnuradio.org/grcon/grcon17/presentations/real-time\\_direction\\_finding/Todd-Moon-Gnuradio-DOA.pdf](https://www.gnuradio.org/grcon/grcon17/presentations/real-time_direction_finding/Todd-Moon-Gnuradio-DOA.pdf)
8. Direction Finding in GNU-Radio [Електронний ресурс] - Режим доступу: [https://www.gnuradio.org/grcon/grcon17/presentations/gr\\_doa\\_gnuradio\\_direction\\_finding/Travis-Collins-gr-doa.pdf](https://www.gnuradio.org/grcon/grcon17/presentations/gr_doa_gnuradio_direction_finding/Travis-Collins-gr-doa.pdf)
9. 07495 Ettus N200-210 DS Flyer.indd [Електронний ресурс] - Режим доступу: [https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/07495\\_Ettus\\_N200-210\\_DS\\_Flyer\\_HR\\_1.pdf](https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/07495_Ettus_N200-210_DS_Flyer_HR_1.pdf)
10. A phase-coherent software-defined radio with five RTL-SDRs [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.crowdsupply.com/krakenrf/krakensdr/updates/all-backer-krakensdr-units-shipped-customer-feedback-virtualbox-and-gnu-radio-block>
11. A.D. Redondo, T. Sanchez, C. Gomez, L. Betancur, R.C. Hincapie, "MIMO SDR-based implementation of AoA algorithms for Radio Direction Finding in spectrum sensing activities", 2015 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM), pp.1-4, 13-15, May 2015.

12. M. Willerton, D. Yates, V. Goverdovsky, A. Manikas, C. Papavassiliou and E. Yeatman “An Array Processing Testbench using LabVIEW and USRP”, National Instruments Case Study, July 2012.
13. A. Akindoyin, M. Willerton, A. Manikas “Localization and array shape estimation using software defined radio array testbed”, 2014 IEEE 8th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), A Coruna, pp. 189-192, June 2014.
14. J. Falk, P. Handel and M. Jansson, “Direction finding for electronic warfare systems using the phase of the cross spectral density”, Proc. Radiometenskap och Kommunikation 2002, Stockholm, Sweden, 2002.
15. 737 LF/HF/VHF/UHF/SHF Spectrum Monitoring System [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://docplayer.net/16458173-737-lf-hf-vhf-uhf-shf-spectrum-monitoring-system.html>
16. Juliy Boiko, Oleksiy Polikarovskiykh, Vitalii Tkachuk “Development and modeling of the antenna system the direction finder unmanned aerial vehicle”, Informatyka Automatyka Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska, April 2023, 13(1):26-32.
17. R&S®ADD197 Dual-polarization VHF/UHF DF antenna [Електронний ресурс] - Режим доступу: [https://www.rohde-schwarz.com/us/products/aerospace-defense-security/advanced-single-channel/rs-add197-dual-polarization-vhf-uhf-df-antenna\\_63493-10202.html](https://www.rohde-schwarz.com/us/products/aerospace-defense-security/advanced-single-channel/rs-add197-dual-polarization-vhf-uhf-df-antenna_63493-10202.html)
18. Wideband Reconfigurable Vector Antenna for 3-D Direction Finding Application [Електронний ресурс] - Режим доступу: [https://oatao.univ-toulouse.fr/24404/1/Duplouy\\_Johan.pdf](https://oatao.univ-toulouse.fr/24404/1/Duplouy_Johan.pdf)