

А. В. Бруско¹
О. Ю. Мирончук¹
М. В. Олійник¹

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКУ НА ДЖЕРЕЛО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ДВОКАНАЛЬНОГО SDR ПРИЙМАЧА

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тема радіопеленгації є вкрай широкою та складною, оскільки має застосування у багатьох сферах життя, від побутових до промислових. Попри велику кількість можливих систем та їхнього призначення, існують доступні рішення, що дозволяють почати дослідження цієї галузі радіотехніки та обробки сигналів, а також можуть слугувати основою для подальшої розробки спеціалізованої системи. Таким рішенням є SDR трансивери та приймачі. Software-defined radio — це радіотехнічні пристрої, що містять в собі необхідні компоненти для оцифровування прийнятих сигналів (у випадку приймачів), та відтворення заданого сигналу (передача, у випадку трансиверів). Конструктивно ці пристрої містять гетеродин для переносу сигналів у частотному діапазоні, а також АЦП/ЦАП для прийому та передачі відповідно.

У роботі реалізовано систему визначення напрямку до джерела сигналу радіовежі FM діапазону на основі двоканального SDR приймача та персонального комп'ютера. Визначення напрямку на джерела сигналу виконано за допомогою алгоритму MUSIC. Для реалізації оброблення сигналу використано програмні рішення GNU Radio та Matlab. Обидві програми широко застосовуються для обробки сигналів. Особливістю GNU Radio є графічний редактор блоків, за допомогою яких здійснюється прийом, обробка, зберігання та передавання сигналів. Matlab відомий своєю універсальністю та застосовується у багатьох сферах окрім радіотехніки. Його використання в цій роботі зумовлено зручною роботою з матрицями, а тому алгоритм MUSIC розглянуто детально і реалізовано відповідно до опису. Алгоритм MUSIC належить до методів оцінювання напрямків на джерело радіовипромінювання за максимуму просторового спектра потужності прийнятого сигналу. Перевагою алгоритму MUSIC серед інших популярних методів оцінки DOA (direction of arrival) є дієздатність навіть за від'ємного співвідношення сигнал-шум. Результатом виконаного дослідження на реалізованій установці є визначення пеленгу на радіовежу в умовах міської забудови. Дослідження виконувалось шляхом аналізу сигналу від радіостанції FM діапазону на частоті 100,6 МГц. Похибка визначення напрямку на джерело радіосигналу склала 6 градусів.

Ключові слова: DOA, SDR, MUSIC, Matlab, GNU Radio, пеленгація, радіолокація.

Вступ

З розвитком технологій, складне радіоелектронне обладнання стало доступнішим та швидко інтегрувалось у повсякденне життя людей, вирішуючи при цьому широкий спектр різноманітних завдань. Радіопередавачі та радіоприймачі зустрічаються ледь не у кожному пристрої, яким користується сучасна людина: ноутбуки, телефони, навушники, розумні світильники та розетки, аудіо-системи, проектори тощо. Часто в цих пристроях передбачена можливість визначати взаємне розташування пристроїв та користувача. Такий функціонал дозволяє оптимізувати передачу даних (наприклад, в системі MIMO), дізнатись напрям до досліджуваного об'єкта, відстань до нього та навіть швидкість руху. Можливість визначати взаємне розташування пристроїв дозволяє поліпшувати параметри системи зв'язку, коригувати положення антен, або діаграму спрямованості антенної решітки [1], [2].

Визначення напрямку на джерело радіовипромінювання є актуальним завданням для бортових навігаційних систем сучасних транспортних засобів повітряного, водяного і наземного базування. Диспетчерський пункт керування також потребує знання інформації про напрямки на супроводжувані ним об'єкти. Особливу увагу цій задачі приділяють в процесі створення безпілотних апаратів та комплексів [3]—[5].

Метою роботи є реалізація пеленгатора джерела радіовипромінювання на основі двоканального SDR приймача та персонального комп'ютера.

SDR приймачі

SDR (Software Defined Radio) приймач — це радіоприймальний пристрій, який використовує програмне забезпечення для обробки сигналів замість традиційних апаратних схем. Такий підхід дозволяє змінювати параметри приймача шляхом програмного налаштування, що надає великої гнучкості та можливості широкого спектра застосувань [6].

SDR приймачі широко використовуються в різних галузях, таких як радіоаматорство, безпека, дослідження та розвідка, мобільні комунікації та інші. Їхні технічні характеристики можуть значно варіюватися в залежності від моделі та призначення. В роботі для реалізації системи визначення напрямку на джерело радіовипромінювання використовується двоканальний SDR трансивер BladeRF 2.0 micro xA4, який має такі характеристики [7]: діапазон робочих частот від 47 МГц до 6 ГГц; частота дискретизації 61,44 МГц з можливістю збільшення до 122,88 МГц; 2×2 MIMO; автоматичне регулювання підсилення; автоматична корекція IQ та зміщення за постійним струмом; підключення по інтерфейсу USB 3.0. Зовнішній вигляд SDR трансивера BladeRF 2.0 micro xA4 показано на рис. 1.



Рис. 1. SDR трансивер BladeRF 2.0 micro xA4

Використання SDR приймача забезпечує перенесення спектра сигналу з носійної частоти в baseband з подальшим його оцифруванням. Далі оцифровані відліки сигналу в baseband передаються до персонального комп'ютера для подальшої цифрової обробки. Структурна схема системи визначення напрямку на джерело радіовипромінювання показана на рис. 2.

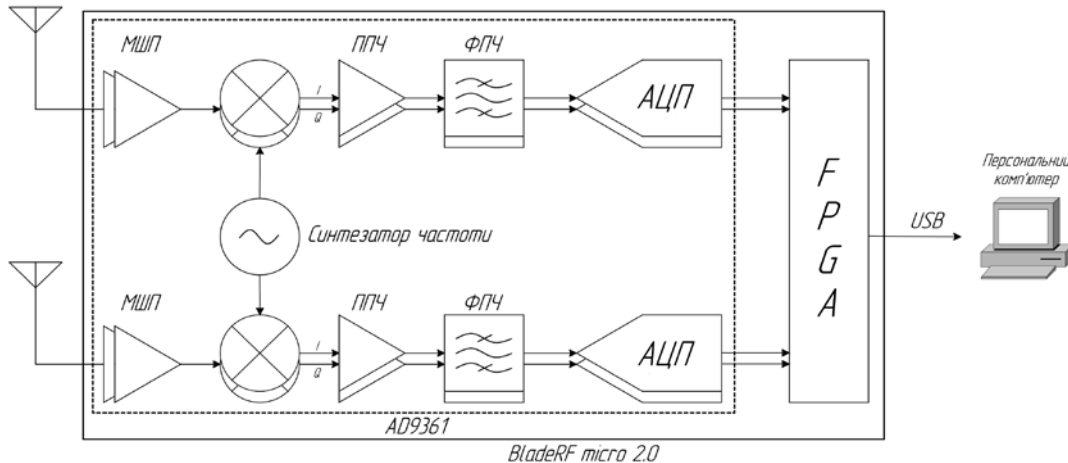


Рис. 2. Структурна схема системи приймача

Двоканальний приймач дозволяє приймати той самий сигнал на дві антени. Рознесені в просторі антени приймають сигнал з різними значеннями фази, що дозволяє визначити напрямки на джерело радіовипромінювання. Дві рознесені в просторі антени по суті є лінійною фазованою антенною решіткою [8], діаграма направленості якої може змінювати напрямки свого головного максимуму, що дозволяє застосувати алгоритми оцінювання напрямку на джерело радіовипромінювання за просторовим спектром потужності прийнятого сигналу. Для якісного визначення напрямку на джерело радіовипромінювання відстань між антенами повинна складати половину довжини хвилі сигналу на робочій частоті.

Програмні засоби обробки

Для взаємодії персонального комп'ютера з SDR використовується спеціальне програмне забезпечення. Таке забезпечення може надавати виробник або це може бути відкритий програмний продукт. Одним із найширше застосовуваних програмних засобів для роботи з SDR є відкритий програмний продукт GNU Radio.

GNU Radio — це потужна інструментальна платформа для розробки та експериментів з програмно-визначеними радіосистемами. Вона уможливує створення, тестування та реалізацію сигнальних обробників у реальному часі. Особливостями GNU Radio є:

- потокова модель;
- графічний редактор блоків;
- сумісність з SDR.

GNU Radio може бути використаний для визначення напрямку приходу (DOA) сигналів з фазованої антенної решітки, використовуючи інструменти для сигнальної обробки та обчислень. Елементи, які можна використовувати для реалізації цієї задачі в GNU Radio:

- фазове оброблення сигналу: використовуються блоки для фазової обробки сигналу, щоб визначити фазову інформацію від кожного з приймачів. Це може включати блоки, такі як PLL (Phase-Locked Loop) для стабілізації фази сигналів;
- визначення DOA: використовуються складніші алгоритми аналізу сигналів. Зазвичай, для цього використовують алгоритми DOA, такі як алгоритм MUSIC (Multiple Signal Classification) або метод Кейпона (MVDR);
- графічний інтерфейс та візуалізація: за допомогою GNU Radio Companion (GRC), можна побудувати графічний інтерфейс для розробки та візуалізації сигналів, фазових даних та обчислених результатів DOA.

GNU Radio також дозволяє відліки оцифрованого прийнятого сигналу записати в файл. Такий підхід дає можливість виконати подальше оброблення сигналу в будь-якому зручному середовищі шляхом вчитування масивів даних з файлу. В цій роботі аналіз прийнятого сигналу виконувався в середовищі автоматизованого проектування MATLAB.

MATLAB — це інтерактивна високорівнева мова програмування та середовище розробки, спеціально призначене для роботи з числовими обчисленнями та маніпуляцій з матрицями [9]. Особливостями Matlab є:

- власна мова програмування;
- зручна робота з матрицями;
- функціональна візуалізація даних;
- велика кількість пакетів доповнення.

MATLAB забезпечений великим спектром функцій для проведення аналізу та обробки радіосигналів. До прикладу, серед цих функцій можна виділити ті, що призначені для фільтрації, модуляції, демодуляції та інших операцій, пов'язаних з сигналами. Важливою його функцією є здатність до представлення сигналів у часовому та частотному доменах, а також їхньої візуалізації завдяки можливостям побудови графіків.

Постановка задачі

Прийнятий сигнал на елементах лінійної антенної решітки описується таким виразом:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (1)$$

де $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_L(t)]^T$ — вектор-стовпець прийнятих сигналів на L елементів антенної решітки; $\mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_M)]$ — матриця напрямків M джерел радіовипромінювання; $\mathbf{a}(\theta_i) = [a_1(\theta_i), a_2(\theta_i), \dots, a_L(\theta_i)]^T$ — керувальний вектор-стовпець антенної решітки у разі приймання електромагнітної хвилі від джерела радіовипромінювання на пеленгу θ_i ; $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$ — вектор сигналів від M джерел радіовипромінювання; $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_L(t)]$ — вектор адитивного гаусівського білого шуму; $[\]^T$ — оператор транспонування.

Значення елементів керувального вектора антенної решітки під час приймання електромагніт-

ної хвилі з плоским фазовим фронтом від джерела радіовипромінювання, що знаходиться на пеленгу θ_i в дальній зоні, розраховується за виразом

$$\mathbf{a}(\theta_i) = \left[1, e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} \sin(\theta_i)}, \dots, e^{\frac{j2\pi d(L-1)}{\lambda} \sin(\theta_i)} \right]^T, \quad (2)$$

де d — відстань між елементами антенної решітки; λ — довжина робочої хвилі.

Задача полягає в оцінюванні пеленгів θ_i за відомих значень прийнятого сигналу $\mathbf{x}(t)$ та керувального вектора антенної решітки $\mathbf{a}(\theta_i)$.

Алгоритм оцінювання напрямку на джерело радіовипромінювання

Одним з найзастосовуваних алгоритмів оцінювання напрямку на джерело сигналу є алгоритм MUSiC. Назва алгоритму MUSiC розшифровується як Multiple Signal Classification — багатофакторний аналіз сигналу. Цей алгоритм розроблено для оцінки напрямку надходження $\mathbf{R} = \mathbf{U}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n \mathbf{\Lambda}_n \mathbf{U}_n^H$ сигналу на решітку датчиків.

Якщо кореляція між джерелом радіовипромінювання сигналу та власними шумами в каналах антенної решітки відсутня, то кореляційну матрицю вхідних сигналів антенної решітки можна подати в такому вигляді [10]

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{x}(t) \cdot \mathbf{x}^H(t)\} = \mathbf{A} \cdot E\{\mathbf{s}(t) \cdot \mathbf{s}^H(t)\} \cdot \mathbf{A}^H - E\{\mathbf{n}(t) \cdot \mathbf{n}^H(t)\} = \mathbf{A} \mathbf{P} \mathbf{A}^H - \sigma^2 \mathbf{I}, \quad (3)$$

де \mathbf{P} — кореляційна матриця джерела радіовипромінювання сигналу; \mathbf{I} — одинична матриця матриця, σ^2 — дисперсія шуму; $[\]^H$ — оператор Ермітового спряження.

У випадку, коли матриця \mathbf{P} вироджена, сигнали від різних джерел не можуть бути розділені, тому в такому випадку виконується новий замір даних, і коли матриця \mathbf{P} стає невивірженою — застосовується алгоритм обробки.

Для того, щоб знайти власні значення \mathbf{R} , рівняння (3) можна представити в такому вигляді:

$$\mathbf{R} = \mathbf{A} \mathbf{P} \mathbf{A}^H - \sigma^2 \mathbf{I} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^H, \quad (4)$$

де \mathbf{U} — одинична матриця; $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L)$ — діагональна матриця з додатними власними значеннями матриці \mathbf{R} .

Суть алгоритму полягає у визначенні кількості власних значень із діагоналі матриці $\mathbf{\Lambda}$, які перевищують σ^2 . Ця кількість і буде кількістю джерел радіовипромінювання.

Якщо поділити $\mathbf{\Lambda}$ на підматриці з власними значеннями сигналів і шуму, то отримаємо

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n \mathbf{\Lambda}_n \mathbf{U}_n^H, \quad (5)$$

де $\mathbf{\Lambda}_n = \sigma^2 \mathbf{I}$; $\mathbf{\Lambda}_s$ — діагональна матриця, що містить M найбільших власних значень матриці \mathbf{R} ; \mathbf{U}_s — матриця сигнального підпростору; \mathbf{U}_n — матриця шумового підпростору.

Оператор проєкції на сигнальний підпростір розраховується за виразом

$$\mathbf{\Pi}_s = \mathbf{U}_s \mathbf{U}_s^H = \mathbf{A} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H. \quad (6)$$

Оператор проєкції на шумовий підпростір розраховується за виразом

$$\mathbf{\Pi}_n = \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H = \mathbf{I} - \mathbf{A} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H = \mathbf{I} - \mathbf{U}_s \mathbf{U}_s^H. \quad (7)$$

Просторовий спектр потужності прийнятого сигналу для алгоритму MUSIC формується за таким виразом:

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta) \cdot \mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta) \cdot \mathbf{\Pi}_n \cdot \mathbf{a}(\theta)}. \quad (8)$$

Напрямок на джерело випромінювання визначається за максимумом потужності в просторовому спектрі. Алгоритм MUSIC має високу роздільну здатність а також може працювати з дуже слабкими сигналами, завдяки статистичному аналізу отриманої суміші сигналу та некорельованих шумів.

Результати експериментальних досліджень

Експериментальна установка містить двоканальний SDR приймач та дві телескопічні антени з круговою діаграмою направленості. За допомогою GNU Radio здійснено запис сигналу радіостанції FM діапазону, на частоті 100,6 МГц. При цьому відстань між антенами становила 1,5 м, що є половиною довжини хвилі на цій частоті.

Обробка записаного сигналу виконана у MATLAB за допомогою алгоритму MUSIC. Обчислено його просторовий спектр. На рис. 3 показано відносне розташування дослідної установки і радіостанції, сигнал якої прийнято. На рис. 4 показано просторовий спектр потужності прийнятого сигналу, розрахований за допомогою алгоритму MUSIC, піком якого є імовірне розташування джерела шуканого радіосигналу.

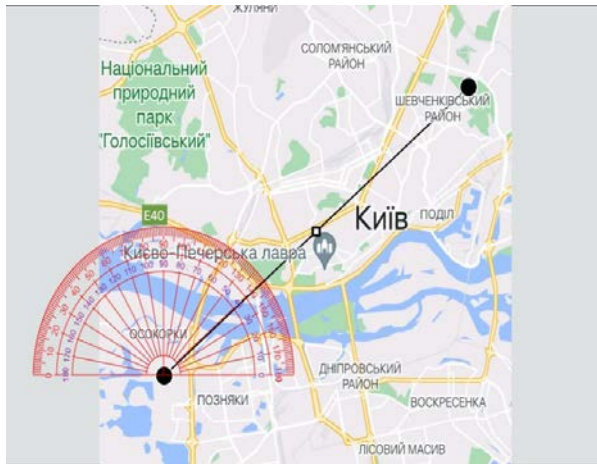


Рис. 3. Місцезположення вежі радіовипромінювання відносно дослідної установки

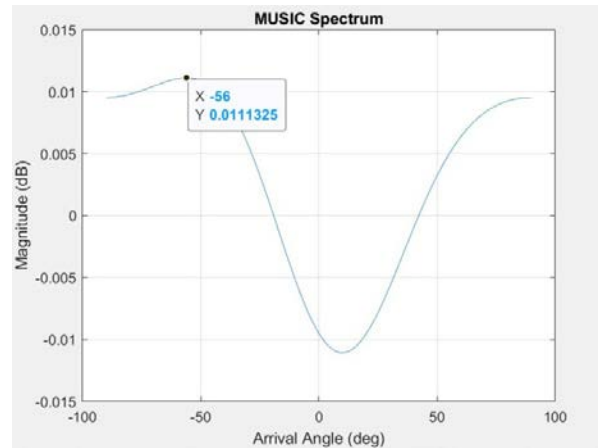


Рис. 4. Просторовий спектр потужності прийнятого сигналу в горизонтальній площині

Кут до радіовежі вимірюється відносно нормалі до площини, у якій розташована антенна решітка, і, як видно з рис. 3, становить -50° від нормалі до площини антенної решітки. З рис. 4 видно, що оцінене значення пеленгу на радіовежу становило -56° . Таким чином похибка оцінювання становила 6° . Результати експерименту підтверджують дієздатність цієї системи.

Висновки

В роботі реалізовано пеленгатор напрямку на джерело радіовипромінювання на основі двоканального SDR приймача та персонального комп'ютера. Розглянуто алгоритм визначення напрямку на сигнал MUSIC. Проведено експеримент, результат якого показав, що в міських умовах похибка визначення напрямку на джерело сигналу становила 6° . Точність визначення напрямку до джерела випромінювання може залежати від багатьох факторів, зокрема від наявних перешкод на шляху від джерела сигналу до приймача, від кількості та взаємного розташування приймальних антен, від наявності активних завад, тощо. Подальшим розвитком цього дослідження буде реалізація системи з більшою кількістю приймальних елементів лінійної фазованої антенної решітки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] C. Liu, and C. T. Ishi, "A Smartphone Pose Auto-calibration Method using Hash-based DOA Estimation," *2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, Atlanta, GA, USA, 2023, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/SII55687.2023.10039085>.
- [2] R. Yijie, and W. Xiaojun, "Non-Blind DOA Estimation Method for 5G Mobile Terminal," *2021 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, Xi'an, China, 2021, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/ICSPCC52875.2021.9564610>.
- [3] D. Fan, G. Guo, J. Song, L. Li, and Y. Zhu, "DOA Estimation for Arbitrarily Distributed Subarrays in UAV Swarm," *2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, Chongqing, China, 2020, pp. 794-799, <https://doi.org/10.1109/ICCC49849.2020.9238865>.
- [4] S. Y. Zhuk, T. V. Malenchuk, O. S. Neuimin, and O. Yu. Myronchuk, "Adaptive Radar Tracking Algorithm for Maneuverable UAV with Probabilistic Identification of Data Using Coordinate and Amplitude Characteristics," *Radioelectron. Commun. Syst.*, no. 65, pp. 503-516, 2022. <https://doi.org/10.3103/S073527272212007X>.
- [5] О. О. Шпилька, О. Ю. Мирончук, А. О. Ткач, С. П. Оверчук, В. О. Катюха, і Ю. А. Мирончук, «Застосування бортових радіопеленгаційних засобів у навігаційних системах малих безпілотних літальних апаратів,» *Військово-технічний збірник*, № 15, с. 48-53, 2016. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.15.2016.48-53>.

- [6] Markus Dillinger, Kambiz Madani, and Nancy Alonistioti, "Software Defined Radio: Architectures," *Systems and Functions*. Wiley & Sons, p. XXXIII, 2003. ISBN 0-470-85164-3.
- [7] BladeRF USB 3.0 *Software Defined Radio Product Brief*. [Electronic resource]. Available: <https://www.nuand.com/bladerf-2-0-micro/>. Accessed: 24.04.2024.
- [8] Robert Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Third Ed., Mailloux, Robert J., Ed., Pub. Artech House classic, 2017.
- [9] Peter Kattan, *MATLAB for Beginners: A Gentle Approach*, Publ.: Petra Books, 2008. ISBN: 978-1539315636.
- [10] Т. Наритник, Г. Авдєєнко, і Є. А. Якорнов, «Моделювання методів пеленгації джерел радіовипромінювання з використанням антенних решіток.» Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології, № 1, 03, с. 115-152, 2022. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-01-03-08>.

Рекомендована кафедрою інформаційних радіоелектронних технологій і систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 9.05.2024

Бруско Андрій Вадимович — студент радіотехнічного факультету, e-mail: andrewbrusko@gmail.com ;
Миرونчук Олександр Юрійович — PhD, старший викладач кафедри радіотехнічних систем, e-mail: myronchukalex@gmail.com ;
Олійник Максим Віталійович — аспірант кафедри радіотехнічних систем, e-mail: oliinyk.ak@gmail.com .
 Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

A. V. Brusko¹
O. Yu. Myronchuk¹
M. V. Oliinyk¹

Determination of the Direction to the Source of Radio Signal Using Two Channel SDR Receiver

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

The topic of radio direction finding is quite broad and complex, as it has applications in many areas of life, from domestic to industrial. Despite the large number of possible systems and their purposes, there are accessible solutions which allow starting research in this field of radio engineering and signal processing and can also serve as a basis for further development of specialized systems. One of such solutions is SDR transceivers and receivers. Software-defined radio is a radio-electronic device that contains all the necessary components for digitizing received signals (in case of receivers) and reproducing a specified signal (transmission, in case of transceivers). Structurally, these devices contain a heterodyne for signal shifting in the frequency range, as well as ADC/DAC for reception and transmission, respectively. This work implements a system for determining the direction to the source of a FM radio signal based on a dual-channel SDR receiver and a personal computer. Direction finding is performed using the MUSIC algorithm. GNU Radio and Matlab software solutions are used for signal processing. Both programs are widely used in digital signal processing. The GNU Radio is unique because of its graphical block editor that is used for signal reception, processing, storage, and transmission. Matlab is known for its versatility and is used in many areas besides radio technology. Its use in this work is justified by its convenient handling of matrices, and therefore the MUSIC algorithm was presented in detail and implemented accordingly. The MUSIC algorithm belongs to methods for estimating directions to the source of radio emissions by maximizing the spatial power spectrum of the received signal. The advantage of the MUSIC algorithm over other popular DOA (direction of arrival) estimation methods is its effectiveness even in negative signal-to-noise ratios. The result of the research on the implemented setup is the determination of the azimuth to the radio tower in urban conditions. The research was carried out by analyzing the signal from an FM radio station at a frequency of 100.6 MHz. The error in determining the direction to the radio signal source was 6 degrees.

Keywords: DOA, SDR, MUSIC, Matlab, GNU Radio, direction finding, radiolocation.

Brusko Andrii V. — Student of the Department of Radioengineering, e-mail: andrewbrusko@gmail.com ;
Myronchuk Oleksandr Yu. — PhD, Senior Lecturer of the Chair of Radioengineering Systems, e-mail: myronchukalex@gmail.com ;
Oliinyk Maksym Vitaliyovych — Post-Graduate Student of the Chair of Radioengineering Systems, e-mail: oliinyk.ak@gmail.com