

## ПРОГРАМНЕ ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ З АМПЛІТУДНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ БАГАТЬОХ СКЛАДОВИХ

<sup>1</sup>Національний університет «Львівська політехніка»

*Програмне оброблення радіосигналів, зокрема технології SDR (Software Defined Radio), мають великий потенціал досліджень різних підходів до оброблення радіосигналів. Такий потенціал можна обґрунтувати великою адаптивністю та гнучкістю платформи SDR, можливістю програмного переналаштування різних радіопараметрів (частотного діапазону, схеми модуляції тощо) без безпосереднього втручання в компонентну базу радіосистеми. Такі особливості дають змогу легко експериментально перевіряти різні концепції та ідеї на практиці.*

*Проведено огляд робіт інших авторів, де висвітлено різні способи використання SDR як одного з основних елементів радіокомунікаційного процесу або для розв'язання прикладних задач.*

*Взявши до уваги переваги SDR над суто аналоговими способами передавання та приймання інформації через радіоканали за використання нестандартних видів модуляції, вибрано різновид амплітудно-фазової модуляції, який характеризується більшою завадостійкістю в порівнянні з широко використовуваною квадратурною амплітудною модуляцією, — амплітудну модуляцію багатьох складових (АМБС). Визначено координати сигнального сузір'я 8-АМБС та на їхній основі створено модель модулятора та каналу передавання.*

*Для реалізації моделі приймальної частини телекомунікаційної системи вибрано раніше запропоновану авторами модель одновірної згорткової нейронної мережі. Запропоновану модель адаптовано до середовища GNU Radio та включено в приймальну частину як окремий блок оброблення інформації, зокрема, вдосконалено процедуру введення та виведення інформації в моделі задля кращої взаємодії з іншими блоками GNU Radio.*

*Запропоновано апаратну базу, що підтримує як GNU Radio так і бібліотеку TensorFlow, використану для формування моделі нейронної мережі. Встановлено імовірність правильного прийняття символу в сформованій системі.*

*Запропоновано програмно-апаратну реалізацію моделі приймальної частини телекомунікаційної системи, яка характеризується більшою адаптивністю та гнучкістю порівняно з традиційними приймачами сигналів з АМБС, що забезпечило підвищення достовірності приймання таких сигналів.*

**Ключові слова:** програмне оброблення сигналів, амплітудна модуляція багатьох складових (АМБС).

### Вступ

Програмне оброблення сигналів, зокрема програмно-визначене радіо (Software Defined Radio — SDR) може становити певний науковий інтерес завдяки гнучкості та адаптивності SDR-систем. Головною особливістю SDR є можливість динамічної зміни параметрів радіоелектронних систем без безпосереднього втручання в їхню апаратну конфігурацію. До таких параметрів можуть належати частотний діапазон, схема модуляції, налаштування потужності.

З літературних джерел видно, як SDR сприяє простішій експериментальній перевірці нових концепцій та алгоритмів оброблення сигналів. Окремо увага приділяється економічній ефективності реалізації SDR-систем, наприклад, запропоновано використовувати мікрокомп'ютер Raspberry Pi як основу для приймача-передавача ЧМ-сигналів [1], запропоновано дешевий приймач середньої частоти для навігаційних систем [2].

Окрім використання SDR саме в телекомунікаційних системах пропонуються різні прикладні застосування в рамках виконання інших задач, зокрема емуляція завад у системах контролю доступу на основі радіочастотної ідентифікації [3], спектральний аналіз у форматі веб-додатка [4].

Використання SDR також пропонується в радарних системах [5], для приймання телеметрич-

них даних з супутників [6] чи передавання даних в аерокосмічних застосуваннях [7].

Також використання SDR пропонується у системах LTE (Long Term Evolution) [8], що демонструє здатність платформи здійснювати оброблення сигналів новітніх стандартів, що також підтверджується реалізацією системи на базі SDR для приймання та передавання радіосигналів частот до 60 ГГц [9].

Беручи до уваги досвід успішного застосування SDR для різноманітних задач та зокрема перевагу адаптивності та гнучкості, можна дійти висновку про доцільність проведення досліджень щодо використання сигналів з нестандартними видами модуляції в процесах передавання та приймання радіосигналів, зокрема сигналів з амплітудною модуляцією багатьох складових (АМБС) [10] та адаптації нестандартних способів демодуляції [11] в системі на основі SDR.

Метою роботи є адаптація підходу оброблення сигналів з використанням одновимірної згортової нейронної мережі до середовища GNU Radio, що дасть змогу апробувати такий підхід для демодуляції АМБС-сигналів за допомогою SDR приймачів.

### Формування моделі передавача

Вибраний вид модуляції — амплітудна модуляція багатьох складових (АМБС). АМБС характеризується наявністю складових, від кількості яких залежить форма сигнального сузір'я, тобто за  $N$  складових сигнальне сузір'я буде вписуватись в  $2N$ -кутник [10]. Формується АМБС-сигнал як сума його  $N$  компонент з різницею у їхніх початкових фазах  $\varphi_0 + \varphi_n$  (рад):

$$U_{\text{АМБС}}(t) = \sum_{n=1}^N U_n a_n U_{\text{min}}(t) \cos(\omega_0 + \varphi_0 + \varphi_n), \quad (1)$$

де  $a_n$  — це коефіцієнт пропорційності для  $n$ -го підканалу;  $U_{\text{min}}(t)$  — модульовальний сигнал на  $n$ -му вході модулятора.

У випадку АМБС з трьома складовими (рис. 1) сигнальне сузір'я можна вписати в шестикутник, а проводячи умовні лінії між окремими точками сузір'я, можна помітити те, що це сузір'я також можна розбити на певну кількість  $N$ -кутників.

У випадку трьох складових сузір'я розбивається на рівносторонні трикутники з довжиною сторін  $d_{\text{сигн}}$ , яку можна описати таким рівнянням:

$$d_{\text{сигн}} = U(M_u - 1), \quad (2)$$

де  $U$  — максимальний рівень амплітуди сигналу,  $M_u$  — кількість рівнів модульовальних сигналів.

Таблиця модуляції (табл. 1) сформована згідно з попередньо запропонованою методикою розрахунку сигнального сузір'я АМБС з трьома складовими [11].

У випадку середовища GNU Radio нестандартні схеми модуляції представляються у комплексному вигляді, де дійсна частина є амплітудою (або синфазною складовою), а уявна частина є фазою (квадратурною складовою) сигналу.

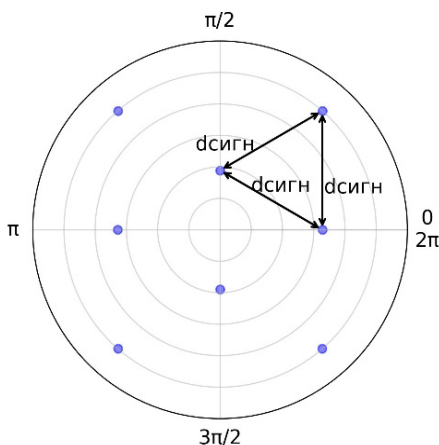


Рис. 1. Сигнальне сузір'я 8-АМБС з позначеними відстанями між найближчими точками

Таблиця 1

Таблиця модуляції 8-АМБС

Символ	Re	Im	Біти
0	6,54	-0,75j	000
1	-6,54	0,75j	001
2	-6,54	-0,75j	010
3	6,54	0,75j	011
4	-6,54	-0j	100
5	6,54	0j	101
6	4,19	-0,37j	110
7	-3,9	0,37j	111

Отримані комплексні числа в подальшому використовуються як аргумент для формування об'єкта сигнального сузір'я — такі об'єкти є основним елементом програмних модуляторів та демодуляторів в SDR.

Запропоновано схему формування 8-АМБС сигналу на основі генератора випадкових значень, модулятора на основі визначеного об'єкта сигнального сузір'я 8-АМБС, блока додаткової корекції фаз. Також до схеми формування 8-АМБС сигналу додано модель каналу передавання для моделювання впливів шумів, частотних зсувів та затримки передавання (рис. 2).

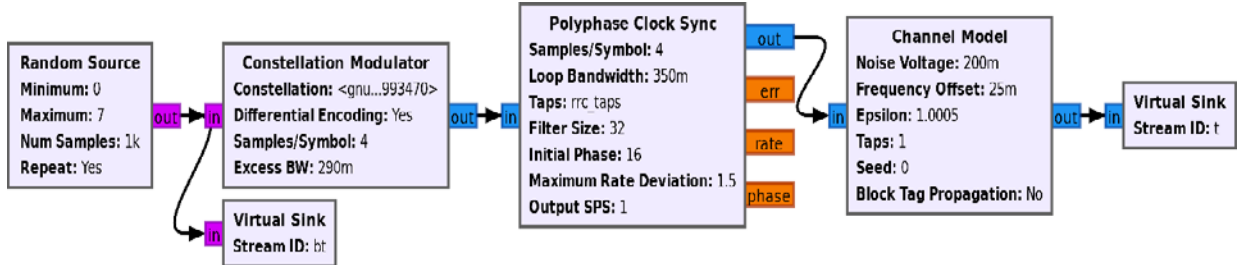


Рис. 2. Модель передавача 8-АМБС в середовищі GNU Radio

У сформовану модель також буде доцільно додати віртуальні виходи — сигнальний та контрольний бітовий — для оцінювання ефективності після проведення демодуляції. Для навчання моделі нейронної мережі віртуальні виходи можна замінити на файлові виходи і далі, в процесі навчання моделі, підвантажити дані з цих файлів.

### Формування моделі нейронної мережі для оброблення радіосигналів

Однією з особливостей середовища GNU Radio є можливість використовувати не тільки апріорі визначені в бібліотеці gnuradio блоки, але й інтегрувати нові алгоритми оброблення сигналів у моделях — у вигляді скриптів Python чи C++. Блоки зі скриптами можуть приймати дані з інших елементів моделі та обробляти їх за визначеною у скриптах логікою.

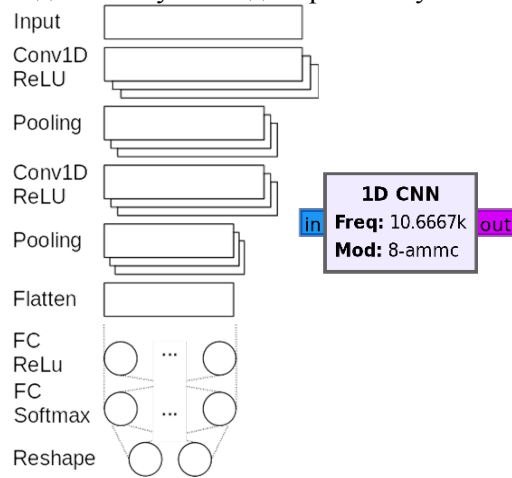


Рис. 3. Структура запропонованої одновимірної згорткової нейронної мережі (зліва) та Python-блок з цією мережею у своїй основі (справа)

Сформований блок оброблення сигналів (рис. 3) приймає миттєві значення сигналів на вхід та видає відповідні їм бітові послідовності на виході. Принцип роботи сформованого блоку полягає в підвантаженні апріорі скомпільованої одновимірної згорткової нейронної мережі оброблення сигналів 8-АМБС. У разі налаштування частоти дискретизації моделі передавача (див. рис. 2) на 4 вибірки та кількості символів, що одночасно обробляються, на 16, розмірність входу штучної нейронної мережі становитиме 64.

Дані з вхідного шару надалі йдуть до першого згорткового шару — таким чином визначаються більш поверхневі локальні особливості та шаблони у вхідному фрагменті сигналу. Використання спершу саме згорткових шарів додає в процес оброблення сигналу інваріантність за зсувом — тобто локальні особливості визначаються незалежно від того, в яких момент часу вони відбуваються.

Після згорткових шарів задано шари пулінгу — вони дають змогу узагальнити дані та зменшити розмірність цих даних перед переходом в подальші шари. Другий згортковий шар в мережі потрібен для аналізу абстрактніших локальних особливостей — таких закономірностей зміни параметрів сигналів, визначення яких може бути надзвичайно складним у випадку використання тривіальніших способів та алгоритмів оброблення сигналів.

Для узагальнення отриманих особливостей та аналізу їх у загальному контексті прийнятого фрагменту сигналу, а також виведення результатів використані повнозв'язні шари. Після вихідного шару також проводиться зміна форми вихідних даних задля простішої подальшої інтерпретації вихідних даних. Вихідні дані у випадку конкретної мережі представляються у вигляді масивів ймовірностей всіх можливих результатів класифікації для кожного символу, тому доцільно їх згрупувати за символами.

Отриманий блок (рис. 4) дає змогу замінити стандартну схему демодуляції, яка містить диференційний декодер за сузір'ям, схеми корекції різних параметрів та блок мапінгу символів.

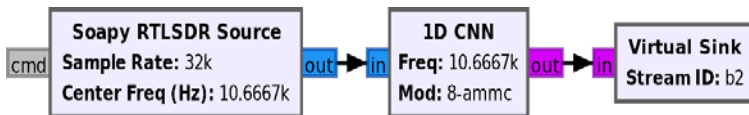


Рис. 4. Схема демодулятора на основі одновимірної згорткової нейронної мережі в середовищі GNU Radio



Рис. 5. Приймач RTL-SDR з дипольною антеною, підключений до одноплатного комп'ютера Pine A64

Як апаратний елемент приймання сигналу для проєкту вибрано RTL-SDR (рис. 5) — популярну систему SDR, що використовує як компонентну базу мініатюрні приймачі телевізійного сигналу стандарту DVB-T, що також здатні приймати широкосмугові сигнали SDR.

Для проведення обчислень вибрано комп'ютер Pine A64-LTS — одноплатний комп'ютер на базі процесора ARM Cortex A53. Доступність GNU Radio та TensorFlow на платформі ARM дає змогу використовувати ті самі алгоритми на цьому комп'ютері, що й на комп'ютерах з процесорами X86-64.

Встановлено, що за відношення сигнал/шум  $-12$  дБ та частоті дискретизації в 3 значення на символ, імовірність правильно прийняти символ становить 0,52 (порівняно з імовірністю правильного приймання символу в еталонній моделі, що становить 0,3 [11]). Установлення саме таких параметрів дає змогу оцінити роботу розробленої системи на межі її можливостей.

стю правильного приймання символу в еталонній моделі, що становить 0,3 [11]). Установлення саме таких параметрів дає змогу оцінити роботу розробленої системи на межі її можливостей.

### Висновки

На основі раніше розроблених алгоритмів та моделей створено їхню адаптацію для середовища GNU Radio, зокрема, демодулятор сигналів 8-АМБС на основі одновимірної згорткової нейронної мережі.

Отримано комплексні координати символів для вибраного виду модуляції, на їхній основі створено відповідний об'єкт сузір'я. Сформовано модель передавача, що використовує модифікований квадратурний модулятор для формування сигналу АМБС.

Раніше запропоновану модель нейронної мережі адаптовано під середовище GNU Radio, внесено зміни до вводу та виводу інформації в моделі, що дають змогу взаємодіяти з іншими блоками GNU Radio.

Створено апаратну систему на основі мікрокомп'ютера на базі ARM Cortex та приймача RTL-SDR для оцінки роботи сформованих моделей. Встановлено що сформована модель показує більшу ймовірність правильного прийняття символу порівняно з еталонною моделлю аналогового приймача АМБС.

Запропонована програмно-апаратна реалізація моделі приймальної частини телекомунікаційної системи характеризується більшою адаптивністю та гнучкістю в порівнянні з традиційними приймачами сигналів з АМБС, що забезпечило підвищення достовірності приймання таких сигналів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] С. Р. Mallikarjuna Gowda, P. Prajwal, K. V. Bellad, V. Hima, and N. Suresh, "Design Implementation of FM Transceiver using Raspberry Pi and SDR," *Proceedings of International Conference on Technological Advancements and Innovations, ICTAI 2021*, pp. 156-161. <https://doi.org/10.1109/ICTAI53825.2021.9673253>.

[2] L. Grundhofer, F. G. Rizzi, N. Hehenkamp, and S. Gewies, "Low Cost SDR Receiver for Medium Frequency R-Mode," *2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, PLANS 2023*, pp. 1208-1214, 2023, <https://doi.org/10.1109/PLANS53410.2023.10140010>.

[3] M. Harvanek, V. Derbek, J. Kral, M. Pospisil, and A. Povalac, "SDR Interference Emulator for RFID Applications," *2021 31st International Conference Radioelektronika, RADIOELEKTRONIKA 2021*, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1109/RADIOELEKTRONIKA52220.2021.9420215>.

[4] R. Yagoub, M. Benaissa, and B. Benadda, "Web Browser Based Real Time Spectrum Analyzer for RTL-SDR Dongles,"

2022 7th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications, ISPA 2022 - Proceedings, 2022, <https://doi.org/10.1109/ISPA54004.2022.9786029> .

[5] K. Hussein, A. S. I. Amar, A. Zekry, M. Abouelatta, A. K. Mahmoud, and M. Mabrouk, "Design and Implementation of SDR Platform for Radar Applications," *2023 International Telecommunications Conference, ITC-Egypt 2023*, pp. 372-375. 10.1109/ITC-EGYPT58155.2023.10206266 .

[6] D. Paik, S. Maheswari, M. Bhaskar, and M. R. Raghavendra, "Implementation of Wide band Satellite Telemetry Data Receiver using SDR and Matlab," *2022 2nd Asian Conference on Innovation in Technology, ASIANCON 2022*. <https://doi.org/10.1109/ASIANCON55314.2022.9908701> .

[7] A. Sankar, S. Darshan, K. M. Devika, Meera, B. Varghese, and P. R. Menon, "SDR based CCSDS Shaped Offset QPSK Modulator for Aerospace Applications," in *2023 9th International Conference on Smart Computing and Communications (ICSCC)*, IEEE, Aug. 2023, pp. 184-189. <https://doi.org/10.1109/ICSCC59169.2023.10335048> .

[8] F. Radu, A. Timofte, A. Balan, and F. Sandu, "LTE Communications Using an SDR Platform," *2020 13th International Conference on Communications, COMM 2020 – Proceedings*, Jun. 2020, pp. 393-396. <https://doi.org/10.1109/COMM48946.2020.9141979> .

[9] N. Maletic et al., "SDR-based 60 GHz Solution for mmWave Applications: Implementation and Evaluation," *2022 30th Telecommunications Forum, TELFOR 2022 - Proceedings*, 2022, <https://doi.org/10.1109/TELFOR56187.2022.9983690> .

[10] І. В. Горбатий, «Нові різновиди модуляції в цифрових радіорелейних системах передавання,» *Проблеми телекомунікацій*, електрон. наук. журнал, № 2 (11), с. 44-55, 2013, [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/132\\_gorbatyy\\_modulation.pdf](https://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/132_gorbatyy_modulation.pdf) .

[11] I. Tsymbaliuk, and I. Horbatiy, "Approach to processing radio signals with amplitude modulation of many components using one-dimensional convolutional neural network," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 9 (126), pp. 14-22, Dec. 2023. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.292854> .

Рекомендована кафедрою інформаційних радіоелектронних технологій і систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 14.03.2024

**Горбатий Іван Володимирович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань, e-mail: [giv@polynet.lviv.ua](mailto:giv@polynet.lviv.ua) ;

**Цимбалюк Іван Ростиславович** — асистент кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань, e-mail: [ivan.r.tsymbaliuk@lpnu.ua](mailto:ivan.r.tsymbaliuk@lpnu.ua) .

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

**I. V. Horbatiy<sup>1</sup>**  
**I. R. Tsymbaliuk<sup>1</sup>**

## Software Processing of Signals with Amplitude Modulation of Many Components

<sup>1</sup>Lviv Polytechnic National University

*Software processing of radio signals, in particular SDR (Software Defined Radio) technology has great potential for research of various approaches to radio signal processing. This potential can be substantiated by the great adaptability and flexibility of SDR platform, the possibility of software reconfiguration of various radio parameters (frequency range, modulation scheme, etc.) without direct intervention into the component base of the radio system. Such features make it possible to experimentally test various concepts and ideas in practice. The article reviews the works of other authors devoted to different ways of using SDR as one of the main elements of the radio communication process or for solving the applied problems. Taking into account the advantages of SDR over purely analog methods of transmitting and receiving information via radio channels when using non-standard types of modulation, a variant of amplitude-phase modulation has been chosen, which is characterized by greater interference resistance in comparison with the widely used quadrature amplitude modulation — amplitude modulation of many components (AMMC). The coordinates of the 8-AMMC signal constellation were calculated and a model of the modulator and transmission channel has been created on their base. To implement the model of the receiving part of the telecommunication system, the one-dimensional convolutional neural network model proposed earlier by the authors was chosen. The proposed model was adapted to the GNU Radio environment and included in the receiving part as a separate information processing block. The procedure for inputting and outputting information in the model was improved for better interaction with other GNU Radio blocks. A hardware base supporting both GNU Radio and the TensorFlow library, which was used to form the neural network model, is proposed. The probability of correct acceptance of the symbol in the formed system is determined. A software-hardware implementation of the model of the receiving part of the telecommunications system is proposed, which is characterized by greater adaptability and flexibility compared to traditional AMMC signal receivers, which ensured an increase in the accuracy of receiving such signals.*

**Keywords:** software signal processing, software defined radio (SDR), amplitude modulation of many components (AMMC).

**Horbatiy Ivan V.** — Dr. Sc. (Eng), Professor, Head of the Chair of Theoretical Radio Engineering and Radio Measurement, e-mail: [giv@polynet.lviv.ua](mailto:giv@polynet.lviv.ua) ;

**Tsymbaliuk Ivan R.** — Assistant of Chair of Theoretical Radio Engineering and Radio Measurement, e-mail: [ivan.r.tsymbaliuk@lpnu.ua](mailto:ivan.r.tsymbaliuk@lpnu.ua)