

Возіану В.А.
*науковий співробітник,
Науково-дослідна лабораторія,
факультет підвищення, кваліфікації та перепідготовки авіаційного персоналу,
Харківський національний університет повітряних сил
<https://orcid.org/0000-0002-9989-5152>*

КОМПЛЕКСНА МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ DMR-АРХІТЕКТУРИ НА ОСНОВІ РАДІОСИСТЕМИ SDR

JEL Classification: O10
SECTION “Economics”: Економіка

Анотація. Проведено аналіз базових підходів по організації архітектури сучасної радіосистеми на основі відкритого стандарту цифрового мобільного радіозв'язку DMR. Представлено базову модель ієрархічно організованого набору мережевих протоколів системи радіозв'язку на базі DMR-сервісу. Визначено складові, на основі яких може бути побудована узагальнену схему організації SDR-системи цифрового радіозв'язку на базі платформи USRP. У рамках базової моделі була проведена формалізація процедури обробки радіосигналу через побудову функціональної діаграми організації комплексу забезпечення радіозв'язку. Представлені підходи можуть бути використані при організації, масштабування і оптимізації DPR-архітектури відповідно цільових показників.

Ключові слова: цифровий мобільний радіозв'язок, DMR-архітектура, радіосистема SDR, платформа USRP, функціональна діаграма, модуляція сигналу, демодуляція сигналу.

Annotation. To date, the definition of the principles of the implementation of the open standard of digital mobile radio communication (DMR: Digital Mobile Radio) as a highly effective and simple approach to the organization of radio systems, which at the same time is characterized by low cost, is considered as an extremely urgent task of scientific research. Compared to such widespread universal standards as iDEN and TETRA, the architecture based on DMR is characterized by a multiple higher bandwidth of the information channel, backward compatibility, a wide toolkit for organizing a radio station based on modern components, as well as flexibility and scalability of the overall system by applying the method of time division of one physical radio communication channel (TDMA: Time Division Multiple Access). In this regard, for developing countries, the DMR standard remains the most relevant means of organizing radial-zone radio communication systems, on the basis of which the automatic distribution of communication channels between subscribers is carried out, which is considered as a stage of the global transition from analog to digital technologies.

The purpose of the study is to build a structural diagram of the architecture of a radio communication system with a DMR architecture based on the USRP, which is regulated at the level of interaction between individual modules, respectively, performing modulation-demodulation operations, digital low-frequency filtering, and symbol synchronization. Within the framework of the study, an assessment of the effectiveness of modeling and the performance of the implementation of the DMR architecture on the correspondingly given model should also be given.

The analysis of the basic approaches to the organization of the architecture of the modern radio system based on the standard of mobile radio communication DMR was carried out. The basic model of an architecturally organized set of network protocols of radio communication systems based on the DMR service is presented. A warehouse has been installed, on the basis of which it would be possible to create the model of the organization scheme of the SDR system used for radio communication based on the USRP platform. In accordance with the basic model, an analysis of the radio signal processing procedure was carried out through the construction of a functioning scheme of the organizational complex for the radio communication. Proposals can be used for the organization, scaling and optimization of the DPR architecture in accordance with the target indicators.

Keywords: digital mobile radio communication, DMR architecture, SDR radio system, USRP platform, functional scheme, signal modulation, signal demodulation.

Вступ

На сьогоднішній день визначення принципів впровадження відкритого стандарту цифрового мобільного радіозв'язку (DMR: Digital Mobile Radio) як високоефективного і простого у впровадженні підходу по організації радіосистем [1-4], що водночас характеризується низькою собівартістю, розглядається як надзвичайно *актуальна задача* наукового дослідження. У порівнянні з такими широко поширеними універсальними стандартами як iDEN та TETRA архітектура на основі DMR характеризується кратно більшою пропускну здатністю інформаційного каналу [3, 4], зворотною сумісністю, широким інструментарієм по організації радіостанції на базі сучасних компонент, а також гнучкістю та масштабованістю загальної системи шляхом застосування методу часового поділу одного фізичного каналу радіозв'язку (TDMA: Time Division Multiple Access). У зв'язку з цим для розв'язку країн стандарт DMR залишається найбільш актуальним засобом організації радіально-зонових систем радіозв'язку, на базі якого здійснюється автоматичний розподіл каналів зв'язку між абонентами, що розглядається як етап глобального переходу від аналогових до цифрових технологій.

Ієрархічно організований набір мережевих протоколів (PS: Protocol Stack), необхідний для організації взаємодії інформаційних вузлів мережі DMR включає у себе наступні складові:

Фізичний рівень стеку (PL: Physical Layer), на якому відбувається обробка сигналу основної смуги радіочастот, як то процедури модуляції, демодуляції, тощо.

Канальний рівень стеку (DLL: Data Link Layer) призначений для передачі даних між вузлами мережі, організації процедур кодування, декодування, тощо.

Рівень керування викликами (CCL: Call Control Layer), на якому здійснюються базові і додаткові послуги системи радіозв'язку відповідно стандартів DMR-сервісу, проводиться контроль якості надання послуг абоненту, тощо.

Побудові математичної моделі, на основі якої визначатимуться цільові функції організації DMR-архітектури, має передувати визначення цільових показників забезпечення радіозв'язку відповідно наступних категорій, а також згідно особливостей роботи радіостанції та запитів окремих абонентів, як це показано на рис. 1:

- розмір голосового пакету (VP: Voice Payload);
- дані по керуванню викликами (CCI: Call Control Information);
- послуги передачі коротких блоків даних (SDS: Short Data Service);
- послуги пакетної передачі даних (PDS: Packet Data Service).

Проведений *аналіз сучасних досліджень* у галузі впровадження DMR-архітектури вказує на переваги застосування у процесі моделювання універсальної програмної платформи для радіопериферії (USRP: Universal Software Radio Peripheral), що надає можливість для побудови прототипу системи радіозв'язку [5, 6].

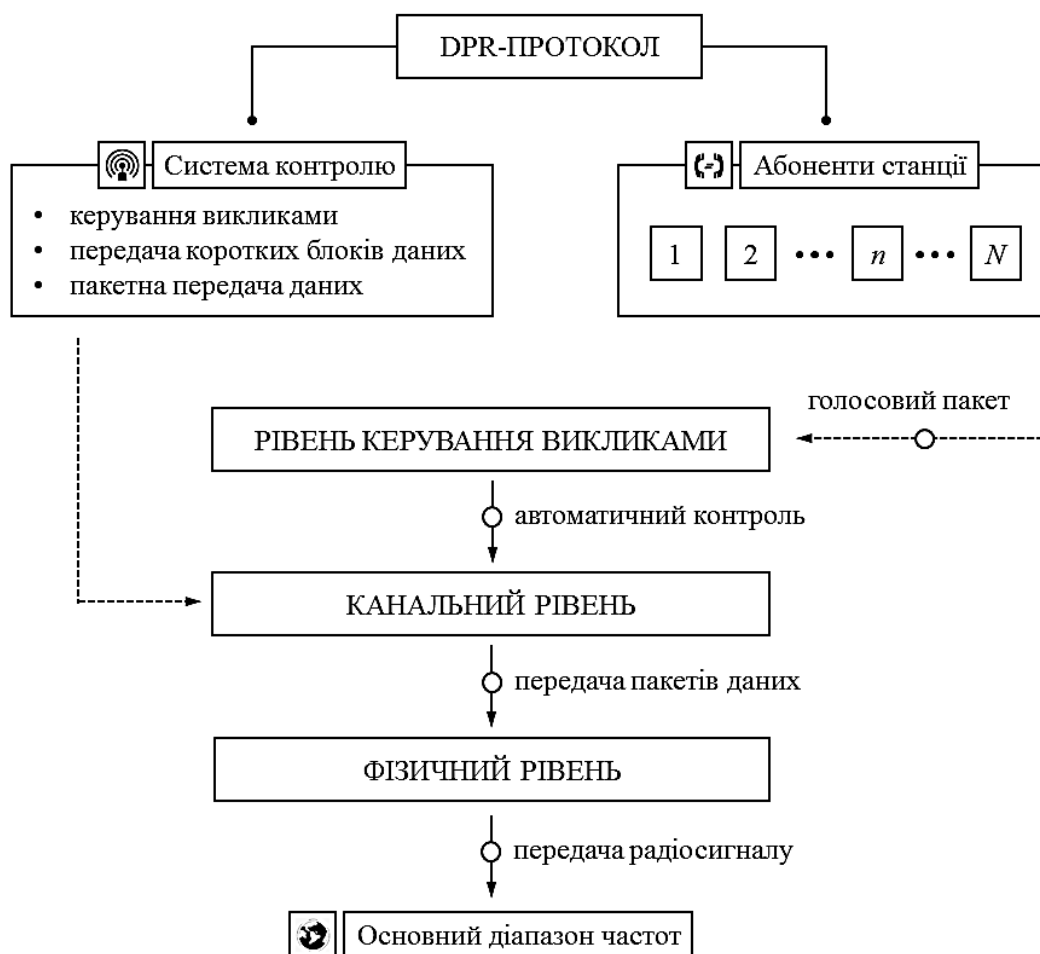


Рис. 1. Ієрархічно організований набір мережевих протоколів DPR

У рамках моделювання радіопристрій USRP розглядається як комбінація процесорів на рівні відповідного вузла мережі і радіочастотних інтерфейсів (RF: Radio Frequency), що широко застосовується у проектуванні сучасних систем радіозв'язку [7 10], як то архітектури з рознесеними передавальними і приймальними антенами (MIMO: Multiple Input Multiple Output), архітектура на основі мобільних протоколів передавання даних (LTE, «LTE Advanced» та інші), радарних систем, тощо. Зазначена платформа, таким чином, характеризується гнучкістю і масштабованістю при проектуванні, а також базується на відкритому коді. Відповідно, це вказує на необхідність побудови цілісної методології, що базується на структурній схемі системи радіозв'язку, яка може бути адаптована для широкого кола задач, що розглядається як невирішена частина загального дослідження.

Таким чином, *метою дослідження* є побудова на основі USRP структурної схеми архітектури системи радіозв'язку з DMR-архітектурою, що регулюється на рівні взаємодії між окремими модулями відповідно виконання операцій модуляції-демодуляції, цифрової фільтрації низьких частот і символної синхронізації. У рамках дослідження також має бути дана оцінка ефективності моделювання та продуктивності впровадження DMR-архітектури на відповідно заданої моделі.

Результати

1. Принципи організації DMR-архітектури системи радіозв'язку

Як було показано вище у основі дослідження лежить застосування платформи USRP, відповідно до якої реалізується інтерфейс прямого аналогового перетворення на базі високошвидкісних аналого-цифрових перетворювачів (ADC: Analog-to-Digital Converter) і цифро-аналогових перетворювачів (DAC: Digital-to-Analog Converter), а також програмована користувачем вентильна матриця (FPGA: Field-Programmable Gate Array) на базі якої здійснюється як цифрове перетворення «вниз» (DDC: Digital Down-Conversion), так і цифрове перетворення «вгору» (DUC: Digital Up-Conversion).

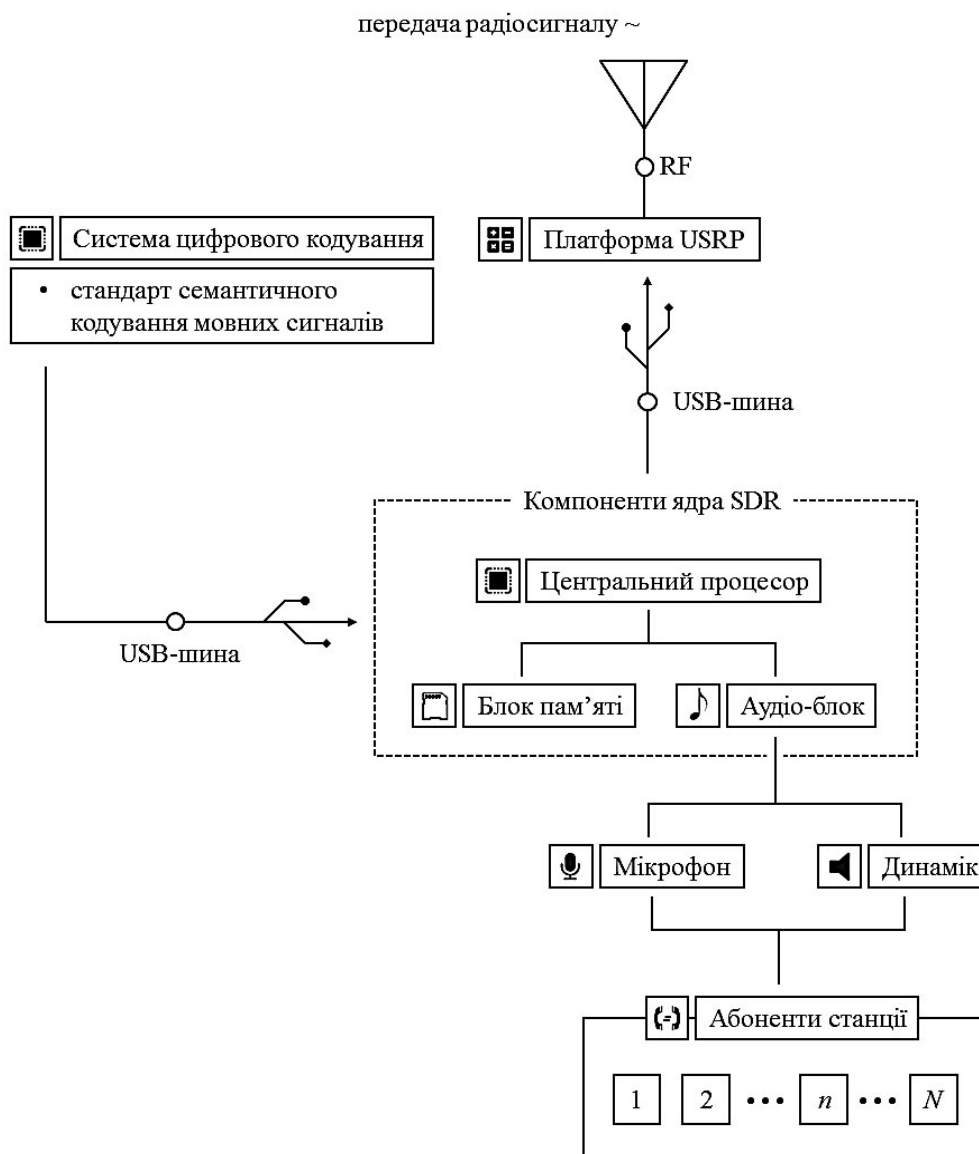


Рис. 2. Узагальнена схема організації SDR-системи цифрового радіозв'язку на основі платформи USRP

Прийняття сигналу здійснюється за допомогою прямого понижуючого перетворення у синфазні (IpS: In-Phase Signal) і квадратурні (QS: Quadrature Signal) сигнали. Процедура DDC супроводжується високошвидкісним аналого-цифровим перетворенням та генерацією на основі IpS та QS пакетів даних для передачі на головний інформаційний вузол для їх подальшої обробки. Математичне моделювання, що має бути проведено у рамках даного дослідження, базуються на

аналізі процесу передачі радіосигналу у межах основної смуги та побудові відповідної радіосистеми, основний блок якої складається з окремих модулів інтегрованих у багаторежимний цифровий комплекс [11, 12] системи радіозв'язку, в якому програмне забезпечення використовується як для модуляції, так і для демодуляції радіосигналів (SDR: Software-Defined Radio), як це показано на рис. 2.

2. *Моделювання процесів модуляції-демодуляції системи радіозв'язку на основі DMR-архітектури*

У свою чергу функціональна діаграма відповідного комплексу включає у себе наступні складові, що можуть бути реалізовані на програмному рівні USRP-платформи (рис. 3):

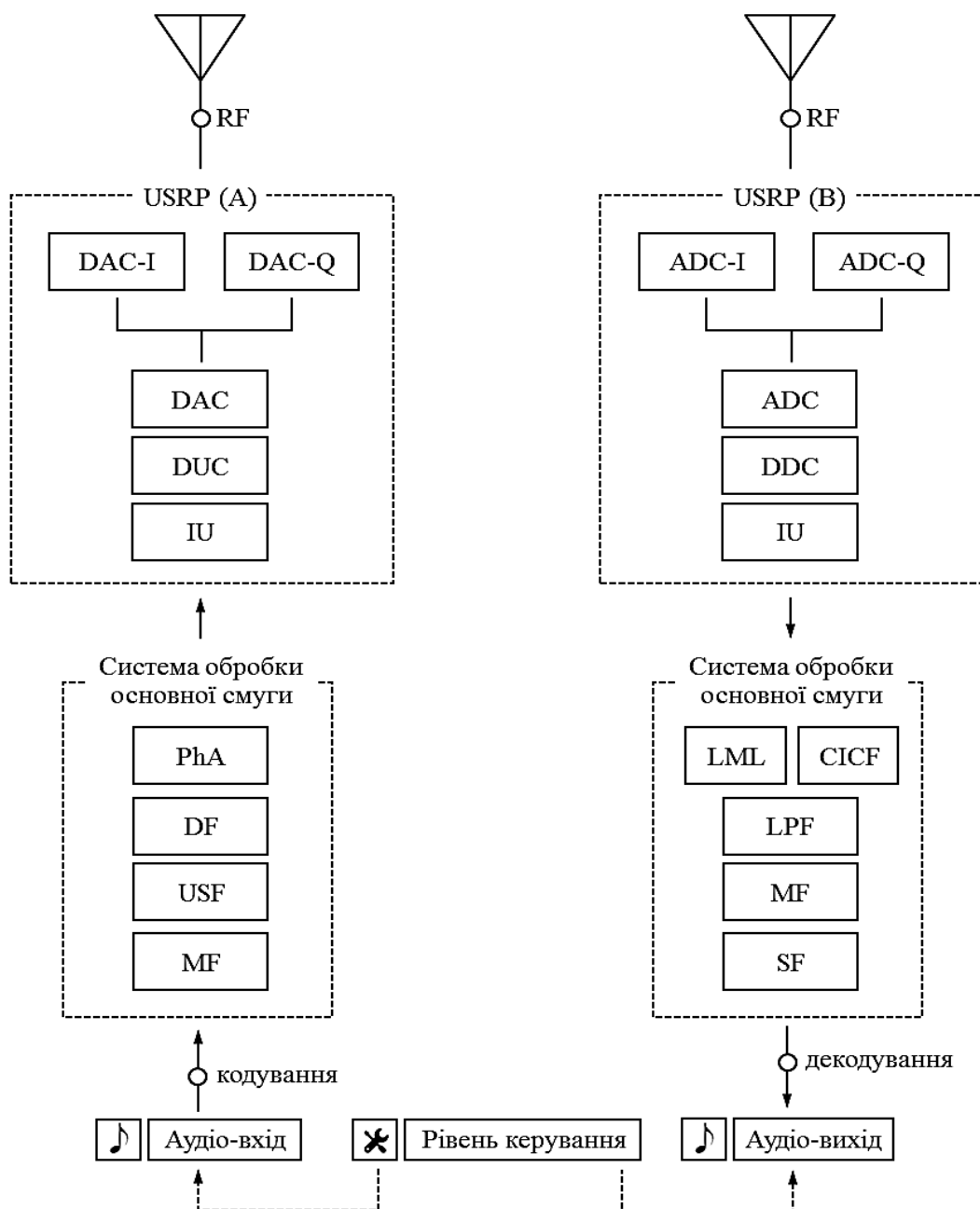


Рис. 3. Функціональна діаграма організації SDR-системи цифрового радіозв'язку на основі платформи USRP

- фільтр відображення (MF: Mapping Filter);
- фільтр підвищення частоти дискретизації (USF: Up-Symbol Filter);
- цифровий фільтр (DF: Digital Filter);
- фазовий акумулятор (PhA: Phase Accumulator);
- каскадний інтегратор-гребінчастий фільтр (CICF: Cascaded Integrator-Comb Filter);
- помножувач (LML: Local Multiplier);
- фільтр низьких частот (LPF: Lowpass Filter);
- узгоджений фільтр (MF: Matched Filter);
- синхронізатор (SF: Synchronizing Filter);
- блок перемежувача (IU: Interleaver Unit);
- ADC, DAC, DDC і DUC на рівні USRP.

Нехай сигнал до модуляції множини інтервалів $\{i \cdot \Delta t\}$ для всіх значень $i \in [1; I]$ описується через функцію $A(i \cdot \Delta t)$. Тоді модульований сигнал як функцію $M(i \cdot \Delta t)$ можна визначити через стандартне перетворення, ввівши значення опорної частоти f_o , амплітуди M_{max} і коефіцієнта k_f , а також усереднення сусідніх значень $A(i \cdot \Delta t)$:

$$M(i \cdot \Delta t) = M_{max} \cdot \cos \left(2\pi \Delta t \left(i f_o + k_f \sum_{j=1}^i \frac{A((j-1) \cdot \Delta t) + A(j \cdot \Delta t)}{2} \right) \right). \quad (1)$$

Надалі значення I- та Q-складових модульованого сигналу $M(i \cdot \Delta t)$ розраховуються через визначення добутку $M(n\Delta t)$ та $\cos()$ і $\sin()$ від $2\pi f_o i \cdot \Delta t$, відповідно:

$$\begin{cases} M_I(i \cdot \Delta t) = M(i \cdot \Delta t) \cdot \cos(2\pi f_o i \cdot \Delta t) \\ M_Q(i \cdot \Delta t) = M(i \cdot \Delta t) \cdot \sin(2\pi f_o i \cdot \Delta t) \end{cases} \quad (2)$$

Після проходження блоку LPF відповідні сигнали моделюються як:

$$\begin{cases} M_I^{LP}(i \cdot \Delta t) = \frac{M_{max}}{2} \cdot \cos \left(2\pi k_f \cdot \Delta t \cdot \sum_{j=1}^i A(j \cdot \Delta t) \right) \\ M_Q^{LP}(i \cdot \Delta t) = \frac{M_{max}}{2} \cdot \sin \left(2\pi k_f \cdot \Delta t \cdot \sum_{j=1}^i A(j \cdot \Delta t) \right) \end{cases} \quad (3)$$

Фаза сигналу $\varphi(i)$ визначається як функція $\arctg()$ від співвідношення $M_Q^{LP}(n\Delta t)/M_I^{LP}(n\Delta t)$, а отже може бути розраховано як:

$$\varphi(i) = 2\pi k_f \cdot \Delta t \cdot \sum_{j=1}^i A(j \cdot \Delta t), \quad (4)$$

а отже різниця фаз для $\varphi(i)$ $\varphi(i-1)$ може бути визначено як

$$\Delta\varphi = 2\pi k_f \cdot \Delta t \cdot A(i \cdot \Delta t), \quad (5)$$

що, у свою чергу, надає можливість визначити функцію $A(i \cdot \Delta t)$ на основі показника різниці фаз. Як показано на рис. 4, розроблений математичний апарат надає можливість провести моделювання процедур модуляції та демодуляції радіосигналу системою на основі архітектури DMR.

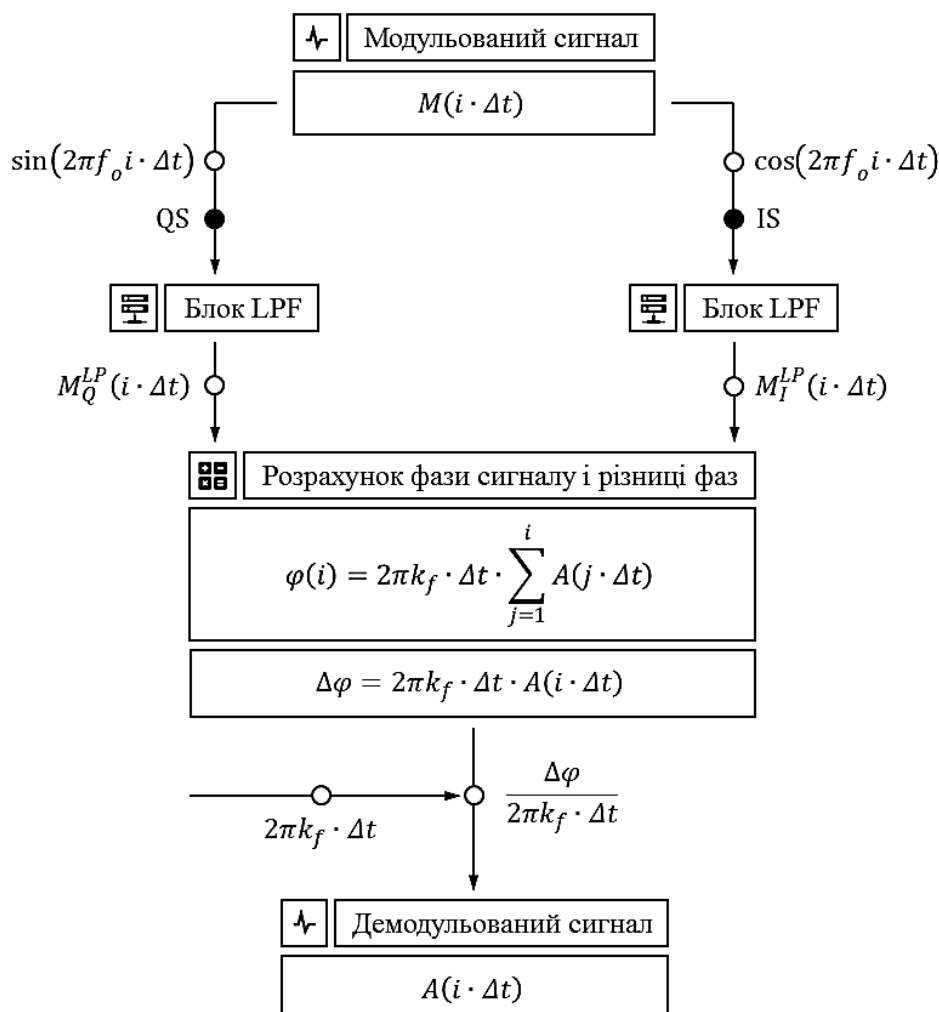


Рис.4. Базова схема модуляції-демодуляції радіосигналу

Розроблена методологія моделювання DMR-архітектури системи, в якій програмне забезпечення використовується для модуляції-демодуляції радіосигналів, надає можливість проводити організацію, реорганізацію, масштабування та оптимізацію схеми загального комплексу відповідно цільових показників.

Висновки

У результаті проведеної роботи було визначено особливості впровадження DMR-архітектури при організації сучасних радіосистем, зокрема SDR-системи цифрового радіозв'язку на основі платформи USRP. При цьому у рамках даного дослідження було:

- розроблено узагальнену схему організації SDR-системи цифрового радіозв'язку на основі платформи USRP;
- проведена формалізація процедури обробки радіосигналу через побудову функціональної діаграми організації SDR-системи цифрового радіозв'язку на основі платформи USRP;

- представлено математичний апарат, на основі якого моделюються процеси модуляції-демодуляції радіосигналу.

Показано, що представлена математична модель надає можливість проводити оптимізацію DPR-архітектури відповідно цільових показників ефективності передачі радіосигналу на етапі організації, реорганізації та масштабування загального комплексу.

Список використаних джерел

1. Ulema, M. (2018) Digital Mobile Radio (DMR). *Fundamentals of Public Safety Networks and Critical Communications Systems*, 107–120. <https://doi.org/10.1002/9781119369554.ch7>.
2. Hao, H., Liu, Y., & Zhao, S. (2018). Phase noise analysis for frequency source based on DMR transceiver applications. *2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*. <https://doi.org/10.1109/icmmt.2018.8563923>.
3. Dunlop J., D. Girma, J. Irvine (2013). The Tetra Technical Specifications. *Digital Mobile Communications and the Tetra System*, 413–414. <https://doi.org/10.1002/9781118832585.app1>
4. Wang, T., & Yow, K. C. (2011). An investigation on iExchange technology in Motorola Iden System. *2011 IEEE 15th International Symposium on Consumer Electronics (ISCE)*. <https://doi.org/10.1109/isce.2011.5973877>.
5. Shehady, M. H., Beydoun, A., & Bazzi, O. (2020). Experimental study of spectrum sensing based on energy detection using USRP. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 8(3), 40–46. <https://doi.org/10.18178/ijeee.8.3.40-46>
6. Marsalek, R., & Pospisil, M. (2014). Evaluation of digital predistortion using the USRP N200 software defined Radio Transceiver. *2014 NORCHIP*. <https://doi.org/10.1109/norchip.2014.7004715>.
7. Gwag, G.-H., Shin, B.-D., Park, D.-W., Eo, Y.-S., & Oh, H.-J. (2016). Design and implementation of 5G mmwave LTE-TDD HD video streaming system for USRP Rio SDR. *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 27(5), 445–453. <https://doi.org/10.5515/kjkiees.2016.27.5.445>.
8. Tasin, S. A., Islam, M. N., Islam, A. K. M. M., & Zubaer, M. M. (2022). Implementation of GSM and LTE re-configurable cellular system using USRP B200. *2022 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)*. <https://doi.org/10.1109/tensymp54529.2022.9864506>.
9. Telagam, N., Reddy, S., Nanjundan, M., & K.N. (2018). USRP 2901 based MIMO-OFDM Transceiver in virtual and remote laboratory. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 6(7), 1033–1040. <https://doi.org/10.26438/ijcse/v6i7.10331040>
10. Yadav, R., Kumar, V., & Kumar, P. (2018). Design and analysis of OFDM system employed in 5G MIMO wireless communication by using in hardware: USRP and lab view software. *International Journal of Computer Applications*, 180(14), 41–46. <https://doi.org/10.5120/ijca2018916274>.
11. Wen, M. (2009) Design of Data Transmission System with Coded 8CPFSK Modulation. *Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing NSWCTC '09. International Conference, vol. 2*, 334-337.
12. Nagurney, L.S. (2009) Software Defined Radio in the Electrical and Computer Engineering Curriculum *Frontiers in Education Conference, FIE '09. 39th IEEE*, 1-6.