

Комплексна методика застосування квантових обчислень для оптимізації мобільних мереж на основі штучного інтелекту

Цяпа Сергій Михайлович¹

Опубліковано	Секція	УДК
30.03.2023	Економіка	384.6:004.89

DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7808312>

Ліцензовано за умовами Creative Commons BY 4.0 International license

Анотація. Проведено аналіз методів оптимізації інфраструктури мережі радіозв'язку через моделювання на основі системи штучного інтелекту та квантових обчислень. Показано ефективність застосування методики автоматизації процедури конфігурації фізичного каналу довільного доступу через призначення індексу кореневої послідовності RSI. Показано, що на математичному рівні зазначена процедура формалізується як вирішення задачі квадратичної необмеженої двійкової оптимізації QUBO для потокових даних мобільної мережі радіозв'язку. У рамках математичного моделювання була розглянута ефективність застосування «квантового відпалу» як метаевристичної методики пошуку глобального екстремуму цільової функції для безконфліктних задач призначення RSI. Відповідно зазначеного підходу набори параметрів для кожної комірки формують відповідні підмножини змінних, що разом створюють множину параметрів мережі радіодоступу, діапазони значень яких вирішуються через розрахунок скінчених і дискретних областей значень, де виконуються умови істинності всіх предикатів. Оцінка ефективності застосування відповідних метаевристичних алгоритмів на основі квантових досліджень з класичними програмними алгоритмами відповідно цільових показників точності та часу обробки набору даних фіксованої довжини. Процедура самоорганізації мережі радіодоступу згідно розробленої схеми включає у себе вирішення задачі квадратичної необмеженої двійкової оптимізації QUBO, що проводиться з застосуванням лазерного відпалу і базується на системі підтримки виконання операцій програмного забезпечення. При цьому для всіх сценаріїв використання визначається точність математичного моделювання, а для оцінки продуктивності роботи комплексу, у свою чергу, використовуються ключові показники ефективності комунікаційної мережі і обчислювального блоку.

Ключові слова: штучний інтелект, квантові обчислення, стандарти радіозв'язку, мобільні мережі, індексу кореневої послідовності, квадратична необмежена двійкова оптимізація, квантовий відпал

¹ старший науковий співробітник, Український науково-дослідного інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України <https://orcid.org/0000-0001-9263-1050>

A comprehensive method of applying quantum computing to optimize mobile networks based on artificial intelligence

Annotation. An analysis of the methods of optimizing the infrastructure of the radio communication network through modeling based on the system of artificial intelligence and quantum computing was carried out. The method of automating the configuration procedure of the physical random access channel through the assignment of the root sequence index is shown. At the mathematical level, this is formalized as the solution of a quadratic unconstrained binary optimization problem for streaming mobile radio network data. In the framework of mathematical modeling, the effectiveness of the application of "quantum annealing" as a metaheuristic method of finding the global extremum of the objective function for conflict-free RSI assignment problems is considered. At the same time, the sets of parameters for each cell form the corresponding subsets of variables, which together create a set of parameters of the radio access network, the ranges of values of which are decided through the calculation of finite and discrete ranges of values, where the truth conditions of all predicates are fulfilled. Evaluation of the effectiveness of the application of the relevant metaheuristic algorithms based on quantum research with classical software algorithms, respectively, of the target indicators of accuracy and processing time of a fixed-length data set. The procedure of self-organization of the radio access network according to the developed scheme includes the solution of the QUBO quadratic unconstrained binary optimization problem, which is carried out using laser annealing and is based on a software operation support system. At the same time, for all scenarios of use, the accuracy of mathematical modeling is determined, and to evaluate the performance of the complex, in turn, key indicators of the effectiveness of the communication network and computing unit are used.

Keywords: artificial intelligence, quantum computing, radio communication standards, mobile networks, root sequence index, quadratic unconstrained binary optimization, quantum annealing

Вступ

Протягом останніх років надзвичайно виросла *актуальність* задачі організації систем квантових обчислень, як з точки зору фундаментальної науки, так і при вирішенні практичних задач [1-6]. Як показав *аналіз наукових досліджень* поєднання концепції квантових обчислень з нейромережевими моделями та ресурсами розподілених інформаційних систем (DIS: Distributed Information Systems) надало можливість кардинально збільшити продуктивність алгоритмів автоматичної оптимізації апаратно-програмних комплексів машинного аналізу [3-6] з метою організації каналів безпечної передачі і обробки великих об'ємів потокових даних у режимі реального часу [7, 8]. Дослідження вказують також на високу продуктивність організації інформаційних мереж з точки зору безпечної передачі даних у рамках квантових комунікацій [9, 10], що є надзвичайно актуальним при побудові архітектури DIS широкого призначення.

Тим не менш, слід зауважити, що на сьогоднішній день не розглянута можливість широкого застосування квантових обчислень при організації інфраструктури мережі радіозв'язку, що розглядається як *невирішена частина* загального дослідження. При цьому, можна вказати, що структура сучасної мобільної мережі є достатньо складною для визначення на аналітичному рівні оптимальних підходів по її реорганізації, модифікації та масштабування [11-17], що вказує на значимість зазначеного завдання.

Таким чином, *метою роботи* стала побудова методології по адаптації методів квантових обчислень при організації, модифікації та оптимізації інфраструктури

сучасної мобільної мережі на рівні застосування відповідних алгоритмів самоорганізації.

Результати

Організація інфраструктури мобільної мережі з застосуванням методів математичного моделювання. Організація інфраструктури сучасної мобільної мережі базується на визначенні параметрів керування конфігурацією радіозв'язку через застосування алгоритмів самоорганізації мережі (SON: Self-Organization Networking), в основі яких, у свою чергу, лежать стандартні аналітичні моделі [18]. Але разом з ускладненням задачі оптимізації відповідної інфраструктури, що пов'язана з експоненційним ростом складності відповідних мереж та вимог до швидкості передачі і аналізу даних, а також неоднорідністю розташування інформаційних вузлів, виникає необхідність у впровадженні систем штучного інтелекту (AI: Artificial Intelligence) і концепції квантових обчислень.

При проведенні математичного моделювання процесів передачі і обробки даних у рамках відповідної інфраструктури, слід зазначити, що множина сценаріїв автоматизації мережі формалізується як дискретний набір, що вирішується як завдання комбінаторної оптимізації (COP: Combinatorial Optimization Problem). При вирішенні задач у рамках COP, як то типової математичної задачі задоволення обмежень (CSP: Constraint Satisfaction Problems) ефективно застосовується уніфікована модель необмеженого квадратичного двійкового програмування (UQBP: Unconstrained Quadratic Binary Programming), яка може бути адаптована при реалізації квантових обчислень [19, 20]. Таким чином, оптимізація інфраструктури мережі радіозв'язку з застосуванням квантових обчислень може бути реалізована через представлення сценаріїв оптимізації мережі радіодоступу (RAN: Radio Access Network), що працює у рамках відповідних стандартів стільникового зв'язку, як математичну задачу CSP, яка вирішується через проведення процедури визначення квадратичної необмеженої двійкової оптимізації (QUBO: Quadratic Unconstrained Binary Optimization). При вирішенні відповідної задачі на математичному рівні визначається індекс кореневої послідовності (RSI: Root Sequence Index) фізичного каналу довільного доступу (PRACH: Physical Random Access Channel), а ефективність зазначеного підходу визначається через співвіднесення цільових показників зі статистичними даними використання класичних програмних алгоритмів оптимізації сучасних мобільних мереж.

Узагальнення алгоритму виконання CSP включає у себе визначення множини N змінних $\{x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_N\}$ які відповідно набору обмежень, виражених через предикати, визначаються у межах скінчених і дискретних областей значень як то $\{\Delta X_1\}$, $\{\Delta X_2\}$, ..., $\{\Delta X_n\}$, ..., $\{\Delta X_N\}$, відповідно. У рамках дослідження оптимальну конфігурацію інфраструктури RAN пропонується визначити через рішення відповідної задачі CSP, що полягає у присвоєнні областей значень змінним $\{x_n\}$ для всіх $n \in [1; N]$ за умови істинності усіх предикатів. При цьому для окремої комірки обмеження пов'язані з загальною топологією RAN та конфігурацією сусідніх комірок. Так для мобільного протоколу передавання даних LTE через істинність відповідних предикатів визначається через різні PCI для сусідніх комірок, а на рівні PRACH це означає також необхідність належного вибору частоти опорного сигналу, коду зони стеження (TAC: Tracking Area Code), та інших параметрів апаратно-програмної платформи комплексу. На рівні математичної моделі параметри $k \in [1; K]$ комірки формалізуються через введення підмножин змінних $\{x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k, \dots, x_N^k\}$, як це показано на рис. 1.

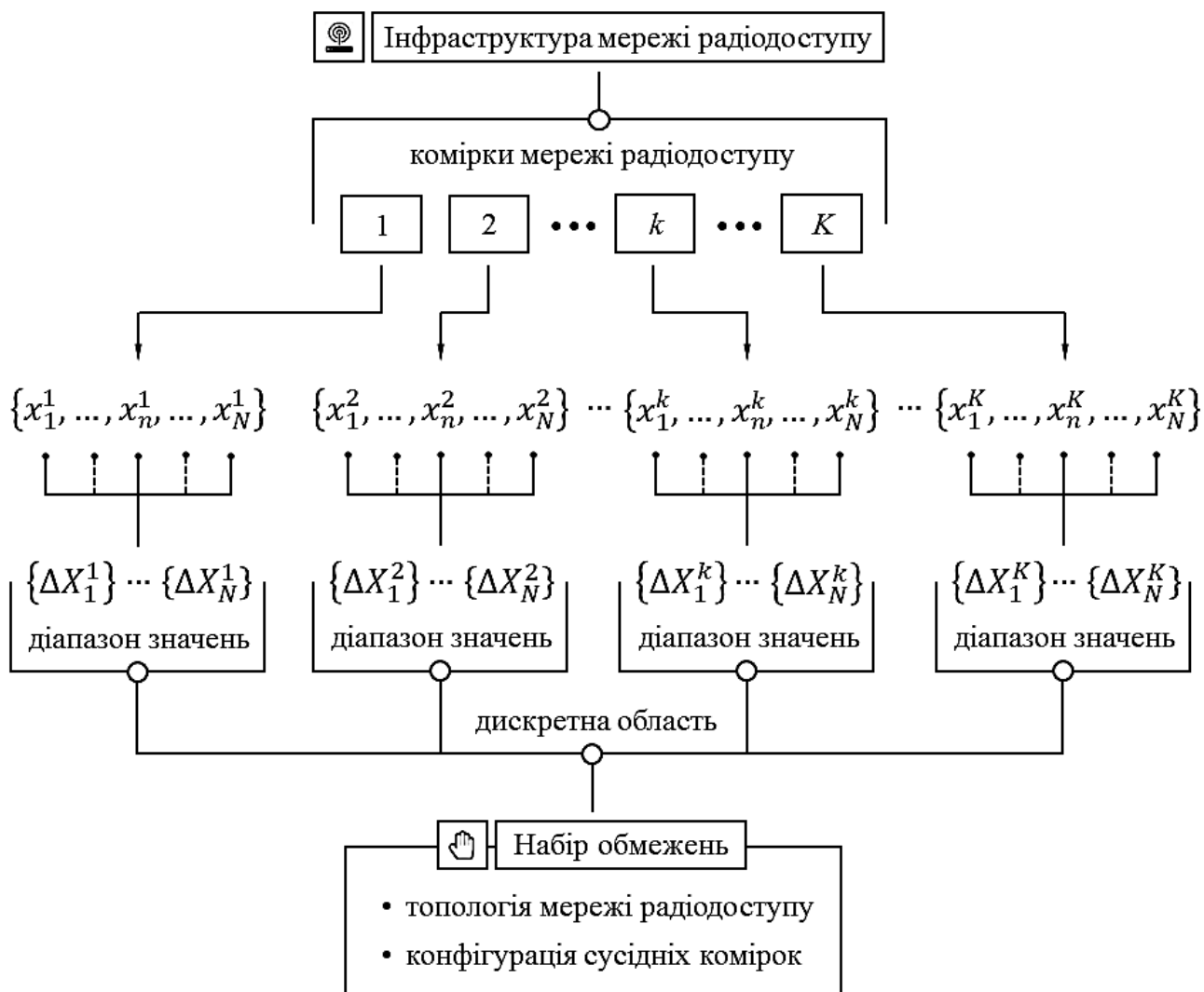


Рис. 1. Методика оптимізації інфраструктури RAN через вирішення задачі CSP для множини параметрів мережі

Для вирішення задачі CSP можуть використовуватись стандартні метаверистичні алгоритми, що обираються відповідно задачі дослідження, але, як це буде показано, застосування апаратно-програмної платформи на основі квантових обчислень надає можливість суттєво розширити інструментарій і збільшити продуктивність машинного аналізу при подальшій оптимізації інфраструктури RAN.

Оцінка ефективності використання квантових обчислень при вирішенні задачі самоорганізації мережі. Використання принципів квантової механіки при моделюванні інформаційних сигналів надає можливість для проведення квантових обчислень, організації каналів квантового зв'язку та впровадження алгоритмів квантової криптографії. Одиницею обчислень при проведенні квантових обчислень є квантовий біт (кубіт), який приймає континуум значень у суперпозиції яких існує до проведення операції зчитування. У якості кубіта може бути використана довільна дворівнева або багаторівнева квантово-механічна система, як то елементарна частинка, квантова точка, тощо. При цьому, можна зазначити, що застосування квантових ефектів (суперпозиція, квантовий відпал, запутаність, тунелювання та ін.) дозволяє суттєво збільшити продуктивність машинного аналізу і зменшити час обробки та передачі даних. Відповідно формулювання задачі дослідження у рамках даної роботи пропонується застосувати процедуру квантового відпалу (QA: Quantum Anneal), як

базового підходу по знаходженню глобального мінімуму заданої функції дискретної множини значень, що включає у себе підмножину локальних мінімумів, кількість яких необмежена. При виконанні процедури QA значення, що розглядається як можливий глобальний мінімум замінюється на випадкове сусіднє значення при відповідному співвідношенні енергетичних станів. Регулювання процедури проводиться відповідно напруженості поля тунелювання (TFS: Tunneling Field Strength), через значення якого визначається розмір області, що підлягає аналізу. На початковому етапі машинного аналізу значення TFS є максимально великим, тому пошук глобального максимуму проводиться для повної множини значень. При наближенні до глобального мінімуму значення TFS зменшується, що, разом з тим, зменшує область аналізу і отже збільшує швидкість наближення до глобального мінімуму. При моделюванні процедури QA у аналіз мають бути включені теплові коливання, зазначений квантово-розмірний ефект дозволяє подолати енергетичні бар'єри, що відповідають локальним максимумам цільової функції, і, таким чином, вирішити проблему визначення локального мінімуму при пошуку глобального мінімуму.

Для застосування QA-процедури проведення QUBO з метою самоорганізації мобільної мережі у рамках концепції SON будується модель блоку квантової обробки (QPU: Quantum Processing Units) на основі пристроїв програмування лазерного відпау. Задача оптимізації RAN при цьому вирішується через пошук глобального мінімуму функції втрат як різновиду цільової функції для дискретного набору аргументів як кількісних показників, що описують автоматизовану роботу мобільної мережі. Загальний комплекс автоматизованої мобільної мережі як централізована архітектура SON (CSON: Centralized Self-Organization Networking), таким чином, включатиме у себе наступні компоненти:

- мережевий ресурс програмування LA;
- блоки обробки поточкових даних, що передаються і обробляються мобільною мережею;
- блоки керування конфігурацією мережі відповідно апаратних і програмних параметрів, що визначають роботу RAN;
- блоки оцінки показників продуктивності автоматизованої роботи мережі з подальшим їх представленням у форматі часових рядів з високим ступенем деталізації;
- блоки діагностики та вирішення конфліктних і аварійних ситуацій, що виникають при роботі мобільної мережі;
- мережевий ресурс інформаційного сховища.

Як показано на рис. 2, базова схема самоорганізації RAN у рамках концепції SON через проведення QUBO з застосуванням QA базується на системі підтримки виконання операцій (OSS: Operation Support System) програмного забезпечення, що забезпечує взаємодію з середовищем комунікаційної мережі. Сама процедура QA і ключові показники ефективності (KPI: Key Performance Indicators) об'єднуються у блоці комбінаторних оптимізаційних моделей, що обираються відповідно експертної оцінки архітектури мережі. Відповідні моделі на математичному рівні формалізуються згідно з моделлю QUBO з застосуванням стандартного набору засобів розробки, утиліт і документації SDK, що спрощує задачу оптимізації. Для сценаріїв використання (UC: Use-Cases), що описують поведінку системи у процесі виконання заданого набору операцій, при впровадженні зазначеного етапу формалізації можна визначити точність математичного моделювання. Надалі розрахунок відбувається на базі квантового комп'ютеру, що повертає результат для проведення пост-обробки, в результаті якої оцінюються оптимальні параметри інфраструктури RAN, що регулюються блоком OSS.

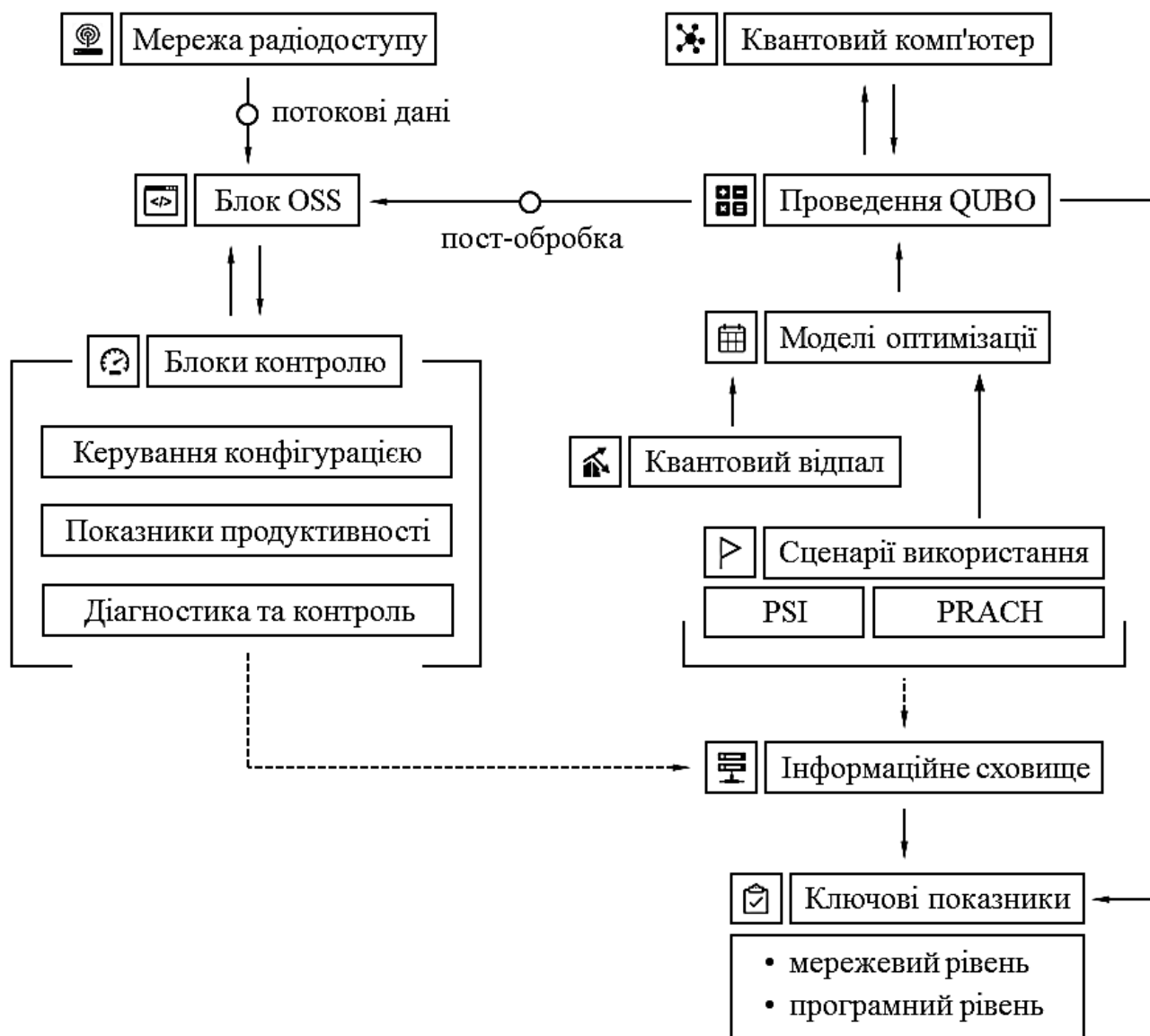


Рис. 2. Схема самоорганізації RAN у рамках концепції SON через проведення QUBO з застосуванням QA

Для оцінки продуктивності роботи загального комплексу відповідно розробленої архітектури та варіантів налаштування параметрів у системі використовуються також ключові показники ефективності (KPI: Key Performance Indicators), дані яких агрегуються як у середовищі комунікаційної мережі, так і в обчислювальному середовищі, і надалі зберігаються у інформаційному сховищі та обробляються блоком OSS.

Висновки

У результаті проведеного дослідження було проаналізовано особливості побудови схеми організації, оптимізації та масштабування мережі радіодоступу у рамках концепції алгоритмів самоорганізації мережі через проведення квадратичної необмеженої двійкової оптимізації з застосуванням процедури лазерного відпалу. При цьому у рамках дослідження з метою розробки цілісної методології застосування квантових обчислень для оптимізації мобільних мереж було розроблено:

- методику оптимізації інфраструктури мобільної мережі радіодоступу через вирішення математичної задачі задоволення обмежень для множини параметрів відповідної мережі;
- комплексну схему самоорганізації мобільної мережі радіодоступу, що базується на системі підтримки виконання операцій, мережевому ресурсі програмування лазерного відпалу, блоках контролю, блоках визначення ключових показників і інформаційному сховищі.

Список використаних джерел

1. Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Rebentrost, P., Wiebe, N. & Lloyd, S. (2017) Quantum machine learning. *Nature*, 549 (7671), pp. 195–202.
2. Venturelli, D. & Kondratyev, A. (2019) Reverse quantum annealing approach to portfolio optimization problems. *Quantum Machine Intelligence*, 1(1-2), pp. 17–30.
3. Bausch, J. (2020) Recurrent quantum neural networks. *Curran Associates: Advances in Neural Information Processing Systems, volume 33*, pages 1368–1379.
4. Abbas, A., Sutter, D., Zoufal, C., Lucchi, A., Figalli, A., & Woerner, S. (2021). The power of Quantum Neural Networks. *Nature Computational Science*, 1(6), 403–409. <https://doi.org/10.1038/s43588-021-00084-1>.
5. Beer, K., Bondarenko, D., Farrelly, T., Osborne, T. J., Salzmann, R., Scheiermann, D. and Wolf, R. Training deep quantum neural networks. *Nature communications*, 11 (1): 1–6.
6. Benedetti, M., Lloyd, E., Sack, S., & Fiorentini, M. (2019). Parameterized quantum circuits as machine learning models. *Quantum Science and Technology*, 4(4), 043001. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ab4eb5>.
7. Neukart, F., Compostella, G., Seidel, C., Dollen, D., Yarkoni, S. and Parney, B. (2017) Traffic flow optimization using a quantum annealer. *Frontiers in ICT*, 2017 (4), p. 29.
8. Orus, R., Mugel, S. & Lizaso, E. (2019) Quantum computing for finance: Overview and prospects. *Reviews in Physics*, 4, p. 100028.
9. Nawaz, S.J., Sharma, S. Wyne, S.K., Patwary, M.N. & Asaduzzaman, M. (2019) Quantum machine learning for 6G communication networks: State-of-the-art and vision for the future. *IEEE Access*, 7, pp. 46 317–46 350.
10. Mitchell, C.J. (2020) The impact of quantum computing on real-world security: A 5G case study. *Computers & Security*, 93, p. 101825.
11. 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>.
12. 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>.
13. Gwag, G.-H., Shin, B.-D., Park, D.-W., Eo, Y.-S., & Oh, H.-J. (2016). Design and implementation of 5G mm-wave 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>.
14. 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>
15. 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>.
16. 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>.
17. 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>.
 18. Imran, A., Zoha, A., Abu-Dayya, A. (2014) Challenges in 5G: How to Empower SON with Big Data for Enabling 5G. *IEEE Network*, 28 (6), pp. 27–33.
 19. Kochenberger, G. A., Glover, F., Alidaee, B., & Rego, C. (2004). A unified modeling and solution framework for combinatorial optimization problems. *OR Spectrum*, 26(2), 237–250. <https://doi.org/10.1007/s00291-003-0153-3>.
 20. Campbell, E., Khurana, A., & Montanaro, A. (2019). Applying quantum algorithms to constraint satisfaction problems. *Quantum*, 3, 167. <https://doi.org/10.22331/q-2019-07-18-167>.
 21. Ahmed, F., Tirkkonen, O., Peltomäki, M., Koljonen, J.-M., Yu, C.-H., & Alava, M. (2010). Distributed graph coloring for self-organization in LTE Networks. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2010, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2010/402831>.
 22. Barenboim, L., & Elkin, M. (2013). Basic distributed graph Coloring Algorithms. *Distributed Graph Coloring*, 29–45. https://doi.org/10.1007/978-3-031-02009-4_3.
 23. Zhang, H., Qiu, X., Meng, L., & Zhang, X. (2010). Design of distributed and Autonomic Load Balancing for self-organization LTE. *2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference - Fall*. <https://doi.org/10.1109/vetecf.2010.5594567>.