

## АНОТАЦІЯ

*Усік П.С. Методи підвищення ефективності розподіленої обробки даних в комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку.* – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія». – Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, 2021.

Дві основні тенденції спонукають індустрію безпроводового зв'язку розвивати мережі стільникового зв'язку п'ятого покоління: стрімке збільшення попиту на безпроводові широкосмугові послуги, які потребують значно більших швидкостей передачі даних та мережі значно більшої ємності, які можуть надавати відео та інші ресурсоємні послуги; та послуги Інтернету Речей (IoT), що спонукають до необхідності масового підключення пристроїв, а також до необхідності наднадійного зв'язку з наднизькою затримкою.

Можна визначити низку різних областей застосування, де будуть використовуватись дані мережі: сюди входить V2X комунікація (комунікація транспортних засобів між собою та з іншими об'єктами інфраструктури); промислова автоматизація та комунальні програми; безпроводові медичні послуги; споживчі та бізнес-послуги віртуальної та доповненої реальності; деякі додатки розумного міста; розумні будинки та велика кількість застосувань мобільного широкосмугового зв'язку.

При цьому, із розвитком стільникових мереж з'являються нові більш досконалі мережеві архітектури для передачі даних та керування. Проте залишається ряд невирішених завдань та проблемних місць, які необхідно вирішувати та усувати відповідно.

Так, наприклад, за останні десятиліття модель хмарних потужностей та обчислень отримала широке застосування в області Інформаційних Технологій (IT). Проте, не дивлячись на свій успіх, впровадження хмарних технологій має подолати декілька проблем, з якими вони зіштовхнулись при появі Інтернету речей (IoT) та

мереж 5-го покоління. В першу чергу, це швидкий ріст кількості пристроїв IoT (такі як сенсори, виконавчі механізми, мобільні телефони та інші прилади доступу), що створюють дуже велику кількість даних, які можуть привести до перевантаження мережі, центрів обробки даних та великих фінансових витрат. По-друге, це велика фізична відстань між пристроями IoT та хмарними центрами обробки даних, що приводить до великих затримок, які можуть бути критичними для деяких чутливих до затримок програмних додатків (наприклад, потокова передача відео високої якості, інтерактивні мобільні ігри, програми доповненої реальності та інші спеціалізовані додатки), які потребують вкрай малої затримки отримання даних від кінцевого пристрою (наприклад, 10 мс або навіть 1 мс). По-третє, додаткам, які розгорнуті в хмарі, тяжко адаптуватися до змін локальних умов (наприклад, точне місцезрештування користувачів та умови роботи локальної мережі) розподілених мобільних пристроїв.

В цілях вирішення цих проблем, пов'язаних з хмарами, нещодавні дослідження представили аналогічну концепцію, яка розширює можливості хмарних розрахунків, які ближче до кінцевих користувачів (тобто на межі мережі) – Mobile Edge Computing or Multi-access Edge Computing (MEC). MEC надає новий рівень розподілених обчислювальних вузлів між пристроями кінцевих користувачів і хмарними центрами обробки даних. Тому додатки, які працюють на MEC, можуть виконувати дії, які близькі до їх користувачів, перед підключенням до хмари.

Таким чином, дана дисертаційна робота спрямована на розробку методів підвищення ефективності розподіленої обробки даних в комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку.

Як було показано, розрахункові потужності на межі стільників – це доволі перспективна концепція в контексті розвитку Інтернету речей, особливо для підтримки залежних від затримки додатків. Головною з основних проблем при цьому є задача по розміщенню релевантних сервісів, яка стосується рішення, в яке ж місце помістити декілька додатків згідно їх вимог до якості надання послуг QoS, це з одного боку, та обчислювальної доступності ресурсу, з іншого боку.

Для цього автором було розроблено метод оптимізації розміщення масштабованих послуг на розподілених обчислювальних ресурсах мережі стільникового оператора, що полягає у послідовному використанні моделі граничних обчислень, узагальненої моделі мережі стільникового оператора та евристичного рішення, заснованого на використанні генетичних алгоритмів.

Даний метод дозволяє зменшити рівень деградація якості обслуговування кінцевих абонентів мережі стільникового оператора, зокрема, затримки на величину до 8 мс для великої кількості абонентів та відповідно великої кількості завдань.

При цьому, ефективне використання ресурсів граничних мобільних обчислень необхідне для гарантування передбачених переваг, які тісно пов'язані з вирішенням наступних завдань:

1. Проблема розвантаження задач, яка полягає у визначенні серверів, на які слід розвантажувати задачі.

2. Проблема розподілу ресурсів додатків, яка визначає обчислювальні ресурси, які повинні бути розподілені для кожної програми, розгорнутої на граничному сервері, щоб обробити всі призначені їм завдання в межах їхніх вимог до затримки.

3. Планування завдань, що визначає порядок, в якому кожне завдання має бути оброблене в спільній програмі, дотримуючись вимог до часу обробки.

Саме ці завдання вирішувались в третьому розділі даної дисертаційної роботи. Крім того, після процесу розвантаження та планування завдань, вирішувалось завдання оптимізації використання обчислювальних ресурсів та енергії в стільникових мережах під час проведення граничних обчислень.

Обробка завантажених завдань з урахуванням їх затримок вимагає прийняття рішення про сервер МЕС, на який слід завантажувати кожне із завдань, визначення ресурсів обчислення для розподілу в додатках IoT, які будуть обробляти завдання, окрім визначення порядку в якому вивантажені завдання повинні оброблятися кожним із додатків. Вирішення трьох вищезазначених завдань сильно впливає на прийняття завдань у мережу, оскільки вони безпосередньо впливають на деякі затримки, які вони зазнають.

Тому, саме для вирішення вище окреслених завдань, було удосконалено метод динамічного розвантаження та планування задач для граничних комп'ютерних систем оператора стільникового зв'язку за рахунок формування задачі змішаного цілочисельного програмування та її вирішення за допомогою декомпозиції Бендерса.

Розроблений метод надає змогу максимізувати кількість допущених та відповідно виконаних завдань на розподілених граничних ресурсах мережі стільникового оператора. При цьому швидкість виконання даного планування та розвантаження підвищилась до 10 разів.

Надалі було досліджено управління випромінюваною потужністю радіопередавачів у стільниковій багатокористувацькій системі в умовах впливу інтерференції. В даному випадку, відмінність цієї системи від вільної від завад у тому, що контроль живлення у багатокористувацькій системі в умовах впливу інтерференції головним чином розподілений через взаємодію між різними користувачами мобільних пристроїв, що дуже ускладнює задачу керування потужністю.

Тому було удосконалено метод керування випромінюваною потужністю мобільних пристроїв під час розвантаження завдань в розподіленій комп'ютерній системі граничних обчислень оператора стільникового зв'язку за рахунок послідовного використання моделі для оцінки умови необхідності розвантаження завдань в мобільній мережі та керування випромінюваною потужністю радіопередавальних пристроїв в каналах з інтерференцією на основі теорії ігор.

Даний метод дозволяє зменшити використання енергії під час використання граничних обчислень в комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку на величину від 5% до 40%.

Теоретичні результати, отримані в дисертаційному дослідженні, відкрили можливість виявити і запропонувати нові практичні шляхи підвищення ефективності функціонування підсистеми базових станцій стільникових мереж під час їх впровадження в Україні на основі використання нових методів керування мережею, передавання даних.

При цьому отримані результати дозволяють:

- зменшити рівень затримки в мережі стільникового оператора 5G до 8 мс;
- проводити більш ефективне керування виконанням завдань в мережі стільникового оператора із використанням граничних обчислень (до 12% підвищений рівень енергоефективності);
- запроваджувати нові сервіси для використання в стільниковій мережі.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в наступному:

- розроблено методику розвантаження завдань в мережі стільникового оператора за допомогою концепції граничних обчислень;
- розроблені комп'ютерні моделі проведення розподілених обчислень в комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку;
- розроблено відповідне алгоритмічне забезпечення для планування та розвантаження завдань в граничних комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку.

Матеріали дисертаційної роботи впроваджено у діяльність ТОВ «ІСП Імперіал» та у навчальний процес Центральноукраїнського національного технічного університету.

Всі отримані результати доцільно використовувати під час планування безпроводових мереж стандарту LTE та 5G, розробки обладнання та програмного забезпечення для систем передачі даних, а також в навчальному процесі.

*Ключові слова:* стільникова мережа, підсистема базових станцій, планування, транспортна мережа, 5G, ефективність, балансування навантаження, MEC.

## ABSTRACT

*Pavlo Usik. Methods for improving the efficiency of distributed data processing in computer systems of cellular operators.* – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the specialty 123 «Computer Engineering». – Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 2021.

Two major trends are driving the wireless industry to develop fifth-generation cellular networks: the rapid increase in demand for wireless broadband services that require much higher data rates, and much higher capacity networks that can provide video and other resource-intensive services; and Internet of Things (IoT) services, which encourage the need to connect devices en masse, as well as the need for ultra-low latency.

You can define a number of different applications where network data will be used: this includes V2X communication (vehicle communication with each other and with other infrastructure); industrial automation and utility programs; wireless medical services; virtual and augmented reality consumer and business services; some smart city apps; smart homes and a large number of mobile broadband applications.

At the same time, with the development of cellular networks, new and more advanced network architectures for data transmission and management appear. However, there are still a number of unresolved issues and problem areas that need to be addressed and addressed accordingly.

For example, in recent decades, the model of cloud capacity and computing has been widely used in the field of Information Technology (IT). However, despite its success, the introduction of cloud technologies must overcome several of the challenges they faced with the advent of the IoT and 5th generation networks. First and foremost, it is the rapid growth in the number of IoT devices (such as sensors, actuators, mobile phones, and other access devices), which generate very large amounts of data that can lead to network congestion, data centers, and high financial costs. Second, there is a large physical distance between IoT devices and cloud data centers, leading to long delays that can be critical for some delay-sensitive software applications (e.g., high-quality video streaming,

interactive mobile games, augmented reality applications). and other specialized applications) that require extremely little delay in receiving data from the end device (for example, 10 ms or even 1 ms). Third, applications deployed in the cloud find it difficult to adapt to changes in local conditions (such as the exact location of users and LAN conditions) of distributed mobile devices.

To address these cloud-related issues, recent research has introduced a similar concept that extends the capabilities of cloud computing that is closer to end users (ie, at the network boundary) – Mobile Edge Computing or Multi-access Edge Computing (MEC). MEC provides a new level of distributed computing nodes between end-user devices and cloud data centers. Therefore, applications that run on MES can perform actions that are close to their users before connecting to the cloud. Thus, this dissertation is aimed at developing methods to improve the efficiency of distributed data processing in computer systems of cellular operators.

It has been shown that computing power at the cell boundary is a rather promising concept in the context of the development of the Internet of Things, especially to support delay-dependent applications. The main problem is the task of placing relevant services, which concerns the decision in which place to place several applications according to their requirements for the quality of QoS services, on the one hand, and the computational availability of the resource, on the other hand.

To do this, the author developed a method for optimizing the placement of scalable services on the distributed computing resources of the cellular network, which consists in the consistent use of the boundary computation model, a generalized model of the cellular network and a heuristic solution based on genetic algorithms.

This method reduces the level of degradation of the quality of service of end users of the cellular operator's network, in particular, delays of up to 8 ms for a large number of subscribers and, accordingly, a large number of tasks.

At the same time, the efficient use of resources of marginal mobile computing is necessary to guarantee the intended benefits, which are closely related to the solution of the following tasks:

1. The problem of unloading tasks, which is to determine the servers on which to unload tasks.

2. Application resource allocation problem, which determines the computational resources that must be allocated for each program deployed on the marginal server to handle all assigned tasks within their latency requirements.

3. Task planning, which determines the order in which each task must be processed in a joint program, adhering to the requirements for processing time.

These tasks were solved in the third section of this dissertation. In addition, after the process of unloading and planning tasks, the task of optimizing the use of computing resources and energy in cellular networks during the boundary calculations was solved.

Processing downloaded tasks based on their delays requires deciding on the MEC server to load each task, determining computing resources for distribution in IoT applications that will handle the tasks, in addition to determining the order in which the downloaded tasks should be processed by each application. Solving the above three tasks greatly affects the acceptance of tasks into the network, as they directly affect some of the delays they experience.

Therefore, it is to solve the above problems that the method of dynamic unloading and scheduling of tasks for the boundary computer systems of the cellular operator was improved by forming the problem of mixed integer programming and its solution by Benders decomposition.

The developed method makes it possible to maximize the number of allowed and performed tasks on the distributed marginal resources of the cellular operator's network. At the same time, the speed of this planning and unloading has increased up to 10 times.

Further, the power control of the radiated power of radio transmitters in a cellular multiuser system under the influence of interference was investigated. In this case, the difference between this system and free from interference is that the power control in a multi-user system under interference is mainly distributed through the interaction between different users of mobile devices, which greatly complicates the task of power management.



Therefore, the method of controlling the radiated power of mobile devices during the unloading of tasks in the distributed computer system of boundary calculations of the cellular operator was improved by sequential use of the model to assess the need for unloading tasks in the mobile network and control the radiated power of radio devices in interference channels. based on game theory.

This method reduces the energy consumption when using limit computing in the computer systems of cellular operators by 5 to 40%.

The theoretical results obtained in the dissertation research opened the possibility to identify and propose new practical ways to increase the efficiency of the subsystem of cellular base stations during their implementation in Ukraine based on the use of new methods of network management, data transmission.

The results obtained allow:

- reduce the level of delay in the network of the 5G cellular operator 5G to 8 ms;
- to carry out more effective management of performance of tasks in a network of the cellular operator with use of boundary calculations (to 12% the increased level of energy efficiency);
- introduce new services for use in the cellular network;
- improve the quality of service for cellular network subscribers.

The practical value of the dissertation is as follows:

- developed a method of unloading tasks in the network of the cellular operator using the concept of boundary calculations;
- developed computer models for distributed computing in computer systems of cellular operators;
- Appropriate algorithmic software has been developed for scheduling and unloading tasks in borderline computer systems of cellular operators.

The materials of the dissertation were introduced into the activities of ISP Imperial LLC and into the educational process of the Central Ukrainian National Technical University. All the obtained results should be used during the planning of wireless networks of the LTE and 5G standard, development of equipment and software for data transmission systems, as well as in the educational process.

**Keywords:** cellular network, base station subsystem, planning, transport network, 5G, efficiency, load balancing, MEC.

### Список основних публікацій здобувача

1. Usik P., Smirnov O., Odarchenko R., Abakumova A., Kundy M. QoE assesment technique for media delivery in 5g networks. *Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*: 2019 IEEE Int. Sci.-Pract. Conf., (Kyiv, Oct. 8–11, 2019). P. 597–601 (**Scopus**).

2. Usik P., Odarchenko R., Volkov O., Simakhin V., Gospodarchuk O., Burmak Yu. 5G networks cyberincidents monitoring system for drone communications. *Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*: 2019 IEEE 5th Int. Conf., (Oct. 22–24, 2019). P. 165–169 (**Scopus**).

3. Ponomarenko O., Bulakovskaya A., Skripnichenko A., Usik P., Olenyuk A. Tomographic application-specific integrated circuits for fast radon transformation. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. No. 2654. P. 339–351 (**Scopus**).

4. Усік П.С., Смірнов О.А. Дослідження перспектив використання технологічних рішень в мережах 5g. *Кібербезпека та інформаційні технології*: монографія. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2020. С. 122–135.

5. Котелянець В.В., Усік П.С., Кищенко В.В., Гнатюк В.О. Інтелектуалізована система моніторингу параметрів навколишнього середовища на базі технології інтернету речей. *Вісник інженерної академії України*. 2018. № 4. С. 133–140,

6. Усік П.С., Полігенько О.О., Одарченко Р.С., Терещенко Л.Ю., Смірнов О.А. «Інформаційна технологія та програмне забезпечення для підвищення ефективності планування підсистеми базових станцій стільникового зв'язку». *Проблеми телекомунікацій*. 2020 № 1(26). С. 83-96.

7. Усік П.С., Смірнов О.А., Миронець І.В., Буравченко К.О., Якименко Н.М. Метод підвищення ефективності розподіленої обробки даних у комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2020. № 4. С. 103–110.

8. Усік П.С., Полігенько О.О., Смірнов О.А. Напрямки підвищення ефективності управління підсистемою базових станцій стільникових операторів. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: тези доп. наук.-техн. конф.*, (м. Київ, 21–23 листоп. 2018 р.). Київ: НАУ, 2019. С. 32.

9. Одарченко Р.С., Мараткызы К., Усик П.С. Анализ перспектив использования сетей 5g для автоматизации производственных процессов. *Өндірістегі цифрлық технологиялар конференциясы: Республикалық ғылыми және практикалық конференциясының жинағы=Цифровые технологии в промышленности: материалы респ. науч.-практ. конф.=Digital technologies in industry: Materials of sci. and pract. conf.* Казахстан, Актау: КГУТИ им. Ш. Есенова, 2019. Каз., рус., англ. С. 42–44.

10. Усік П.С., Смірнов О.А., Якименко Н.М. Перспективи використання мережевих технологічних рішень в 5g. *Інформаційна безпека та інформаційні технології (Information Security and Information Technologies): II Міжнар. наук.-практ. конф.*, (м. Кропивницький, 2–3 квіт. 2020 р.). С. 56.

11. Усік П.С., Смірнов О.А. Підвищення ефективності функціонування підсистеми базових станцій на основі Multi-Access Edge Computing. *Інформаційні технології – 2020 (IT-2020): VII Всеукр. наук.-практ. конф. молодих науковців*, (м. Київ, 21 трав. 2020 р.). С. 135–136.

12. Chumachenko B.S., Zaitseva N.O., Grigorenko D.K., Usik P.S. Research of the advantages and disadvantages of the network virtualization of network resources of a consistent architecture of 5g networks. *POLIT. Challenges of science today*, (Apr. 1–3, 2020). P. 99–100.