

УДК 004.75:004.67

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.27>**М. О. ВОЛК**

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0003-4229-9904

А. М. БУГРІЙ

кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0002-9059-3200

І. А. САМОЙЛОВ

аспірант кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0000-2829-2744

А. А. ФУРМАНОВ

магістрант кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0005-0370-9829

О. Ю. ЖУРАВЛЬОВ

магістрант кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0005-5072-7245

Д. М. ВОЛК

студентка кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0008-1425-485X

СИМУЛЯЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ ТУМАННИМИ ТА ОБЛАЧНИМИ ОБЧИСЛЕННЯМИ ДЛЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

В останні роки можна спостерігати значну еволюцію інформаційних технологій, зокрема перехід від окремих комп'ютерів та мереж до хмарних обчислень. Розвиток телекомунікаційних технологій, у тому числі і технології 5G дозволяє хмарним застосуванням мати доступ до значних обсягів даних. Великі дані, що обробляються хмарою, викликають необхідність наближати обчислювальні ресурси до кінцевого користувача. У статті представлено новий симулятор для туманних обчислень, який має назву FogGRASS. Його розроблено з метою підтримки процесів моделювання розподілених систем та управління обчислювальними ресурсами в розподілених обчислювальних мережах. Програма моделювання надає можливість гнучкої конфігурації мережі, підтримки мобільних та статичних пристроїв, керування обчислювальними ресурсами та мінімізації затримок. FogGRASS дозволяє моделювати різні сценарії та стратегії, включаючи конфігурацію вузлів, сховищ даних, параметри передачі даних та обчислювальні потужності. Проведені експерименти демонструють високу гнучкість, масштабованість, ефективне використання центрального процесора та пам'яті, а також зменшення затримки при виконанні задач з збільшенням навантаження в системі. Аналіз результатів моделювання показав високу ефективність і масштабованість при моделюванні великих мереж туманних вузлів: зі збільшенням кількості пристроїв система демонструвала стабільну роботу із використанням менше 25% ресурсу центрального процесора та 15% оперативної пам'яті. Це свідчить про здатність запропонованої системи ефективно працювати навіть у великих мережах. Окрім цього, було проведено тестування затримок виконання завдань при різних обсягах навантаження. Результати показали, що система здатна забезпечувати низькі затримки навіть при виконанні великих обчислювальних завдань. FogGRASS є перспективним інструментом для дослідників, які вивчають технології IoT та розподілені системи.

Ключові слова: хмарні обчислення, розподілені системи, туманні обчислення, моделювання, мережі, комп'ютерні ресурси, масштабування.

M. O. VOLK

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0003-4229-9904

A. M. BUHRII

Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0002-9059-3200

I. A. SAMOILOV

Postgraduate Student at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0000-2829-2744

I. A. FURMANOV

Master's Student at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0005-0370-9829

I. A. ZHURAVLYOV

Master's Student at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0005-5072-7245

D. M. VOLK

Student at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0008-1425-485X

SIMULATION AND MANAGEMENT OF FOG AND CLOUD COMPUTING FOR THE INTERNET OF THINGS

In recent years, one can observe a significant evolution of information technologies, in particular, the transition from individual computers and networks to cloud computing. The development of telecommunications technologies, including 5G technology, allows cloud applications to access significant amounts of data. Big data processed by the cloud creates a need to bring computing resources closer to the end user. The article presents a new simulator for fog computing called FogGRASS. It was developed to support the processes of modelling distributed systems and managing computing resources in distributed computing networks. The simulation program provides the possibility of flexible network configuration, support of mobile and static devices, management of computing resources and minimisation of delays. FogGRASS allows you to simulate different scenarios and strategies, including the configuration of nodes, data stores, data transmission parameters and computing power. The experiments that were conducted demonstrate high flexibility, scalability, efficient use of the central processor and memory, and a decrease in the delay when performing tasks with an increase in the load on the system. Analysis of the simulation results showed high efficiency and scalability when simulating large networks of fog nodes. With an increase in the number of devices, the system demonstrated stable operation using less than 25% of the CPU resource and 15% of the RAM. This indicates the ability of the proposed system to work effectively even in large networks. In addition, task performance delays at different workloads were tested. The results showed that the system can provide low delays even when performing large computing tasks. FogGRASS is a promising tool for researchers studying IoT technologies and distributed systems.

Key words: cloud computing, distributed systems, fog computing, modelling, networks, computing resources, scaling.

Постановка проблеми

Fog computing (туманні обчислення) є однією з нових парадигм хмарних систем, які пов'язані з периферійними обчисленнями [1]. У порівнянні з хмарними центрами обробки даних, fog computing забезпечує віртуалізоване обчислювальне середовище, що розгортається ближче до джерел даних або кінцевого користувача [2]. Тумані знаходяться між хмарою та пристроями кінцевого користувача. Хмара та туман надають подібні послуги кінцевим користувачам, але туман розгортається для сприяння певному географічному регіону для пришвидшення первинної обробки даних. Туман не може існувати автономно, він доповнює хмарні обчислення та розроблений для

підтримки програм, які чутливі до затримки виконання задач, тоді як хмара, що, як правило, знаходиться далеко від користувача, може демонструвати більшу затримку. Fog надає послуги для програм IoT як із комп'ютерної мережі, так і з таких пристроїв, як маршрутизатори, точки доступу та інші [3].

Туманні вузли сприяють надійності, відмовостійкості та масштабованості пристроїв, що також зменшує трафік між туманним вузлом і серверними хмарними центрами обробки даних.

Перебуваючи в стані розвитку, туманні обчислення не мають стандартів з точки зору строгої архітектури та платформ моделювання. На сьогодні доступно декілька симуляторів туманних систем, частина з яких є відкритими, але решта є комерційно доступними. Існуючі симулятори туманних обчислень в основному реалізують ряд пристроїв для моделювання. Як правило, існуючі симулятори більш схильні до конфігурацій датчиків, де датчики генерують необроблені дані, а вузли туману використовуються для обробки даних до надсилання у хмару або сховище даних. Подібні симулятори не мають можливості враховувати мережні параметри і передбачають, що середовище працює надійно і безпомилково. Ще недоліком таких симуляторів є відсутність можливості додавати власні алгоритми керування туманною системою.

Розглянемо деякі з часто використовуваних симуляторів, які можна використовувати для туманних систем. В [4] запропоновано DPWSim, розроблений для додатків IoT з підтримкою сервіс-орієнтованих моделей. В [5] описана система SimIoT, яка надає кілька механізмів зв'язку для датчиків IoT і хмарних центрів обробки даних. Існує розширення EdgeCloudSim системи CloudSim [6], яке модифікує хмарний симулятор для моделювання сценаріїв периферійних обчислень. Ще одно розширення CloudSim з використанням технології Java (iFogSim) запропоновано в [7], де реалізовано вплив методів управління ресурсами з точки зору затримки, перевантаження та вартості.

В [8] представлено мобільний симулятор IoT під назвою MobIoTSim, який надає дослідникам платформу для навчання роботі з пристроями Інтернету речей без покупки додаткових датчиків і пристроїв. SimpleIoTSimulator є широко використовуваним інструментом для моделювання середовища IoT за допомогою моделей датчиків і пристроїв. Він також підтримує низку специфічних протоколів IoT, таких як MQTT, CoA тощо. Аналогічно, IBM запропонувала симулятор IoT із підтримкою PaaS під назвою IBM Bluemix. Він надає веб-інтерфейс для швидкого розгортання хмарних програм, які можуть збирати дані з різних датчиків і пристроїв.

Фреймворк Google Cloud включає рішення Google IoT, яке надає різні сервіси Google [9]. Пропонований фреймворк має високу масштабованість і дозволяє використовувати велику кількість пристроїв, збирає дані та забезпечує платформу візуалізації.

Детальне порівняння існуючих симуляторів з запропонованим, показано у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння існуючих систем моделювання туманних обчислень

Симулятори	Мережа	Відкритий код	Мобільні пристрої	Моделі користувача	План.	Споживання енергії
MobileFog	ні	ні	так	ні	ні	ні
Edge-Fog cloud	ні	так	обмеж.	ні	ні	ні
Cooja	ні	так	обмеж.	ні	ні	ні
EmuFog	так	так	ні	ні	ні	ні
RECAP	так	NA	ні	ні	ні	NA
FogTorch	ні	так	ні	ні	ні	ні
EdgeCloudSim	ні	так	ні	ні	так	ні
iFogSim	ні	ні	так	ні	так	ні
Google IoT Sim	ні	ні	так	ні	ні	ні
IBM BlueMax	ні	ні	так	ні	ні	ні
SimpleIoTSimulato	ні	ні	так	ні	ні	ні
MobIoTSim	ні	так	так	ні	ні	ні
FogGRASS	так	так	так	так	так	так

Більшість симуляторів, розглянутих вище, не є гнучкими, та не мають можливостей дослідникам включення власних моделей та алгоритмів планування. Крім того, існуючі симулятори в основному зосереджені на пристроях, які вони можуть підтримувати; однак мережеві протоколи та комунікаційний стек не враховуються повністю. Щоб перевірити та проаналізувати такі алгоритми, існує потреба в гнучкому, відкритому та швидкому в розгортанні симуляторі туманних обчислень.

Формулювання мети дослідження

Мета даної роботи полягає у підвищенні ефективності досліджень систем туманних обчислень шляхом створення середовища моделювання на базі існуючої системи GRASS [10], яке на відміну від існуючих дозволяє врахувати моделі мережі, мобільних пристроїв, користувачів та алгоритми планування і оцінки енергоспоживання.

Викладення основного матеріалу дослідження

FogGRASS розроблено як розширення системи імітаційного моделювання розподілених хмарних обчислень GRASS [10]. GRASS – інструмент із відкритим вихідним кодом, який надає бібліотеки для моделювання характеристик GRID систем. Він надає низку вбудованих модулів, які діють як реалістичні мережеві пристрої, брокери ресурсів та інше. На рисунку 1 показано дизайн запропонованого фрейворку FogGRASS. У FogGRASS можна легко інтегрувати всі доступні модулі GRASS.



Рис. 1. Структура фрейворка FogGRASS

Дослідники можуть легко модифікувати модулі FogGRASS для моделювання своїх сценаріїв. Основна мета розробки FogGRASS полягає в тому, що існуючі фреймворки розроблені для підтримки різних датчиків. Однак вони не враховують такі характеристики мережі, як частота помилок і швидкість передачі даних, які можуть відігравати вирішальну роль у моделюванні програм, чутливих до затримок. Основними модулями FogGRASS є брокер, туманний вузол і кінцеві пристрої. Брокер – це централізований менеджер ресурсів, який відстежує всі туманні вузли. Туманний вузол надає послугу обчислень. Кінцевий пристрій – це фактичний вузол/датчик, який може рухатися під час зв’язку та генерувати запити для обчислювальних вузлів. Вузол-посередник отримує запит від пристроїв на виконання запитуваного обчислення. Вузол посередника підтримує чергу, звідки запити обслуговуються за принципом «першим прийшов – першим обслужено». Таким чином, брокер відповідає за планування, виконання та передачу завдань.

FogGRASS забезпечує гнучкість конфігурації мережі. Користувач може визначати параметри мережі відповідно до своїх проектних вимог. Таким чином, можна змоделювати більш реалістичну мережу. FogGRASS містить низку протоколів зв’язку, які можна використовувати для моделювання різноманітних сценаріїв. Наразі доступними протоколами є TCP, UDP, FTP, HTTP, MQTT, CoAP і AMPQ. HTTP, TCP і UDP також можна використовувати для зв’язку з центром обробки даних. FogGRASS підтримує різноманітні пристрої та туманні вузли зі змінною кількістю додатків, які можуть виконуватися на кожному вузлі одночасно.

FogGRASS пропонує можливість моделювання реальних мереж, що дозволяє дослідникам налаштовувати параметри мережевої інфраструктури, включаючи топологію, швидкість передачі даних, затримки, частоту помилок та інші важливі характеристики. Симулятор підтримує як дротові, так і бездротові мережі, що дає змогу відтворювати реальні сценарії використання туманних обчислень у розподілених мережах.

Однією з ключових функцій системи є можливість підтримки **передачі завдань** між туманними вузлами, що особливо важливо в сценаріях з високою мобільністю. Якщо вузол туману не може обробити новий запит через перевантаження або недостатні ресурси, брокер передає завдання на сусідні вузли, що дозволяє мінімізувати затримки та забезпечувати безперервність виконання завдань.

FogGRASS надає широкі можливості для моделювання обчислювальних завдань, що дозволяє ефективно тестувати різні сценарії використання обчислювальних ресурсів. Важливою особливістю є підтримка завдань різного розміру та складності, від малих до великих, що дає змогу моделювати реальні умови використання систем IoT і розподілених обчислень. Наприклад, малим завданням можуть бути запити на обробку даних від датчиків, що генерують невеликі обсяги інформації, тоді як великі завдання можуть вимагати значної обчислювальної потужності для аналізу відео або інших складних обчислень.

Для оцінки продуктивності симулятора був змодельований сценарій комунікаційної мережі з системою керування трафіком для туманних вузлів, де розгортається кілька статичних датчиків для збору інформації. Дані обробляються на туманних вузлах. Крім того, є користувачі, які підписалися на ці датчики залежно від їхнього географічного розташування. Користувачі також можуть генерувати запит на обчислювальні ресурси для здійснення пошуку чи прогнозування. Датчик генерує дані через рівні проміжки часу. Вузол-посередник отримує дані та передає їх на вузол fog для обробки, а результати розповсюджуються на фіксовані пристрої. Крім того, пристрої можуть надсилати запит на обчислювальну потужність вузлу-посереднику. Посередник призначає ресурси на основі політики планування та після виконання надсилає результат на запитаний пристрій. Під час виконання завдання брокер також відстежує запитані або підписані пристрої для операцій передачі.

Масштабованість FogGRASS вимірюється з точки зору використання пам'яті та ЦП. Тому, оскільки IoT складається з великої кількості пристроїв, важливо порівняти запропонований FogGRASS з точки зору використання пам'яті та ЦП. Затримка вимірюється щодо завдання виконання. Завдання поділяються на великі (1500 MIPS), середні (900 MIPS), малі (200 MIPS) і випадкові (випадкове число від 200 до 1500 MIPS). Зазвичай різні функції вимагають різної обчислювальної потужності. Наприклад, у системі керування трафіком ідентифікація об'єктів із моментального знімка або прогнозування руху групи можуть займати різний час виконання.

Експериментальна оцінка (рис. 2) показала, що FogGRASS демонструє високу ефективність і масштабованість при моделюванні великих мереж туманних вузлів. Зі збільшенням кількості пристроїв до 1300 система демонструвала стабільну роботу із використанням менше 35% центрального процесора та 25% оперативної пам'яті, що свідчить про її здатність ефективно працювати навіть у великих мережах.

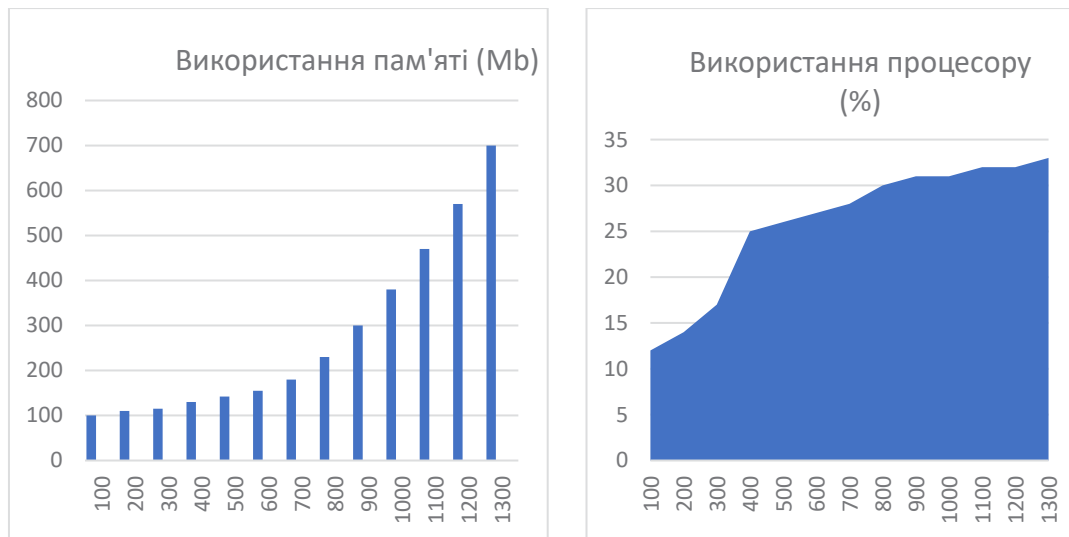


Рис. 2. Використання ресурсів системою FogGRASS залежно від кількості вузлів

Окрім цього, було проведено тестування затримок виконання завдань при різних обсягах навантаження. Результати показали, що система здатна забезпечувати низькі затримки навіть при виконанні великих обчислювальних завдань. Важливим аспектом було також тестування частоти помилок у бездротових мережах, де система показала високу надійність.

Висновки

У роботі запропоновано симулятор FogGRASS, який є потужним інструментом для моделювання туманних обчислень. FogGRASS дозволяє дослідникам інтегрувати власні алгоритми планування ресурсів, моделювати різні типи мереж, включаючи мобільні пристрої та статичні вузли. У порівнянні з існуючими симуляторами, FogGRASS надає більшу гнучкість у налаштуванні параметрів мережі та враховує важливі аспекти, такі як частота помилок, затримка передачі даних та енергоспоживання [11].

У майбутньому планується розширити можливості симулятора, включивши підтримку міграції віртуальних машин та сумісність між різними туманними мережами. Це відкриє нові можливості для дослідників у галузі розподілених обчислювальних систем, дозволяючи тестувати більш складні сценарії та оптимізувати використання ресурсів у туманних обчисленнях. FogGRASS також надає можливості для дослідження нових алгоритмів управління мобільними пристроями та розподілу обчислень в умовах обмежених ресурсів.

Список використаної літератури

1. Shi, Dustdar S. The promise of edge computing. *Computer*, vol. 49, no. 5, pp. 78–81, 2016.
2. Bonomi F., Milito R., Zhu J., Addepalli S. “Fog computing and its role in the internet of things,” in Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing. ACM, 2012, pp. 13–16.
3. Bellavista P., Foschini L., Scotece D. Converging mobile edge computing, fog computing, and IoT quality requirements. *Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*, 2017 IEEE 5th International Conference on. IEEE, 2017, pp. 313–320.
4. Han S. N., Lee G. M., Crespi N., Van Luong N., Heo K., Brut M., Gatellier P. DPWSim: A simulation toolkit for IoT applications using devices profile for web services. *Internet of Things. 2014 IEEE World Forum on. IEEE*, 2014, pp. 544–547.
5. Sotiriadis S., Bessis N., Asimakopoulou E., Mustafee N. Towards simulating the Internet of things. *Advanced Information Networking and Applications Workshops*, 2014 28th International Conf on IEEE, 2014, pp. 444–448.
6. Sonmez C., Ozgovde A., Ersoy C. Edgecloudsim: An environment for performance evaluation of edge computing systems. *Fog and Mobile Edge Computing. 2017 Second International Conference on IEEE*, 2017, pp. 39–44.
7. Gupta H., Vahid Dastjerdi A., Ghosh S. K., Buyya R. iFogSim: A toolkit for modelling and simulation of resource management techniques in the internet of things, edge and fog computing environments. *Software: Practice and Experience*, vol. 47, no. 9, pp. 1275–1296, 2017. DOI:10.1002/spe.2509
8. Pflanzner T., Kertész A., Spinnewyn B., Latr'e S. MobIoTSim: towards a mobile iot device simulator. 2016 IEEE 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (Fi- CloudW). IEEE, 2016, pp. 21–27.
9. Google cloud platform. <https://cloud.google.com/iot-core/>, accessed: 23.09.2024.
10. Filimonchuk T., Volk M., Ruban I., Tkachov V. Development of information technology of tasks distribution for grid-systems using the GRASS simulation environment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3/9 (81). pp. 45–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71892
11. Mamchych O., Volk M. A unified model and method for forecasting energy consumption in distributed computing systems based on stationary and mobile devices. *Radioelectronic and Computer Systems, [S.I.]*, v. 2024, n. 2, p. 120–135. DOI: <https://doi.org/10.32620/ reks.2024.2.10>.

References

1. Shi, Dustdar, S. (2016) The promise of edge computing. *Computer*, vol. 49, no. 5, pp. 78–81.
2. Bonomi, F., Milito, R., Zhu, J., Addepalli, S. (2012) “Fog computing and its role in the internet of things,” in Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing. ACM, pp. 13–16.
3. Bellavista, P., Foschini, L., Scotece, D. (2017) Converging mobile edge computing, fog computing, and IoT quality requirements. *Future Internet of Things and Cloud*. 2017 IEEE 5th International Conference on. IEEE, pp. 313–320.
4. Han, S., N., Lee, G., M., Crespi, N., Van Luong, N., Heo, K., Brut, M., Gatellier P. (2014) DPWSim: A simulation toolkit for IoT applications using devices profile for web services. *Internet of Things (WF-IoT)*, 2014 IEEE World Forum on. IEEE, pp. 544–547.
5. Sotiriadis, S., Bessis, N., Asimakopoulou, E., Mustafee, N. (2014) Towards simulating the Internet of things. *Advanced Information Networking and Applications Workshops*, 2014 28th International Conf on IEEE, pp. 444–448.
6. Sonmez, C., Ozgovde, A., Ersoy, C. (2017) Edgecloudsim: An environment for performance evaluation of edge computing systems. *Fog and Mobile Edge Computing. 2017 Second International Conference on IEEE*, pp. 39–44.
7. Gupta H., Vahid Dastjerdi A., Ghosh S. K., Buyya R. (2017) iFogSim: A toolkit for modelling and simulation of resource management techniques in the internet of things, edge and fog computing environments. *Software: Practice and Experience*, vol. 47, no. 9, pp. 1275–1296. DOI:10.1002/spe.2509
8. Pflanzner, T., Kertész, A., Spinnewyn, B., Latr'e, S. (2016) MobIoTSim: towards a mobile iot device simulator. 2016 IEEE 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops. IEEE, pp. 21–27.
9. Google cloud platform. <https://cloud.google.com/iot-core/>, accessed: 23.09.2024.
10. Filimonchuk, T., Volk, M., Ruban, I., Tkachov, V. (2016) Development of information technology of tasks distribution for grid-systems using the GRASS simulation environment. *Information and controlling system*, Vol. 3/9 (81). pp. 45–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71892
11. Mamchych, O., Volk, M. (2024) A unified model and method for forecasting energy consumption in distributed computing systems based on stationary and mobile devices. *Radioelectronic and Computer Systems, [S.I.]*, n. 2, p. 120–135. DOI: <https://doi.org/10.32620/ reks.2024.2.10>.