УДК 621.391.8

ПІДВИЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ МЕРЕЖІ 5G/NR З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ДЕКОМПОЗИЦІЇ

DOI 10.36994/2707-4110-2020-1-28-03

Стрелковська І. В., д. т. н., проф. Національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, Одеса, Україна. irina7000370@gmail.com

Клименко К. Г., Національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, Одеса, Україна. katyaklem@gmail.com

Толмак В. Є., Національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, Одеса, Україна. tolmakvova@gmail.com

Анотація. У роботі розглядається мережа мобільного зв'язку п'ятого покоління 5G на базі технології NR (New Radio). 5G мережа дозволяє значно розширити спектр високошвидкісних послуг, включно з послугами Інтернет речей. Рекомендацією 3GPP TR 38.913 визначено групу послуг мережі 5G, до яких віднесено технології з визначеними показниками часу затримки пакетів. Розвиток цих технологій вимагає від оператора забезпечення необхідних значень характеристик якості QoE. Мережа 5G/NR базується на програмно-конфігурованій мережі радіодоступу SDR (Software Defined Radio) та опорній мережі SDN (Software Defined Networking). Для підтримки характеристик QoE різних груп послуг в мережі 5G/NR використовують метод декомпозиції. Цей метод дозволяє створювати топологічну конфігурацію мережі для різних умов надання послуг. При цьому важливим питанням реалізації методу декомпозиції є можливість визначення характеристик якості QoE. Рішення цієї задачі ускладнює те, що мережа має складну архітектуру побудови та є динамічною. А також при розподілі однієї мережі на декілька підмереж, можлива ситуація, коли частина фізичних ресурсів може одночасно відноситись до декількох підмереж. Метою роботи є дослідження середнього часу затримки пакетів в мережі, використовуючи тензорний контурний метод на основі декомпозиції. Цей метод дозволяє одночасно досліджувати як структурні, так і функціональні характеристики мережі. Для мережі 5G/NR пропонується виконати декомпозицію шляхом розподілу її на підмережі. Для цієї мережі знайдено: значення середнього часу затримки пакетів в контурах кожної підмережі, значення середнього часу затримок пакетів в граничних гілках кожної підмережі, значення середнього часу затримки пакетів в граничних гілках для мережі в цілому. На практиці ці результати можливі, для проектування та подальшої експлуатації мережі e-health, коли виконується вибір топології мережі та характеристик обладнання.

Ключові слова: мережа мобільного зв'язку 5G/NR, метод декомпозиції, характеристики QoE, середній час затримки пакетів, тензорний контурний метод.

IMPROVING THE QUALITY CHARACTERISTICS OF THE 5G / NR NETWORK USING THE DECOMPOSITION METHOD

Irina Strelkovskaya, Dr.hab, Prof., O. S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications, Odessa, Ukraine. irina7000370@gmail.com

Kateryna Klymenko, O. S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications, Odessa, Ukraine. katyaklem@gmail.com

Volodymyr Tolmak, O. S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications, Odessa, Ukraine. tolmakvova@gmail.com

Abstract. *The paper examines a 5G mobile network based on the NR (New Radio) technology. The 5G network allows you to significantly expand the range of high-speed services, including Internet of Things services. Recommendation 3GPP TR 38.913 defines a group of 5G network services, which include technologies with defined packet latency. The development of these technologies requires the operator to ensure the required values of the QoE characteristics. 5G/NR is based on Software Defined Radio (SDR) and Software Defined Networking (SDN) backbones. To maintain the QoE characteristics for various groups of services in a 5G / NR network, a decomposition method is used. This method allows to create a topological network configuration for various conditions of providing services. In this case, an important issue in the implementation of the decomposition method is the ability to determine the QoE characteristics. The solution of this problem is complex due to the fact that while being dynamic, the network has a sophisticated architecture. Moreover, in the process of dividing one network into several subnets, there is a possibility for some physical resources to be simultaneously involved in several subnets. The purpose of this work is to study the average packet delay time for a network by means of the tensor contour method based on the decomposition. This method allows to simultaneously explore both the structural and functional characteristics of a network. We propose to perform decomposition of the 5G/NR network through dividing it into subnets. We have evaluated the following characteristics for the mentioned network: the average value of packet delay time in the loops of each subnet, the average value of packet delay time in the border branches of each subnet, the average value of packet delay time in the border branches for the whole network. These results have the practical significance for design and further operation of an e-health network. Precisely, they are applicable to select a network topology and to estimate characteristics of the necessary equipment.*

Keywords: 5G / NR mobile network, decomposition method, QoE characteristics, average packet delay time, tensor contour method.

Вступ

Розвиток мережі мобільної зв'язку п'ятого покоління 5G на базі технології NR (New Radio) дозволяє оператору значно розширити спектр високошвидкісних послуг, які надаються включно з послугами Інтернет речей IoT (Internet of things).

Рекомендацією 3GPP TR 38.913 визначено групи послуг мережі 5G, до яких віднесені технології з різними значеннями часу затримки пакетів, таких як групи мобільного широкосмугового доступу eMBB, масивних машинних комунікацій mMTC та послуги з'єднання з наднизькою затримкою URLLC [1-2]. Розвиток цих послуг вимагає від оператора збільшення швидкості передачі даних і забезпечення необхідних значень характеристик якості QoE.

Архітектура мережі 5G/NR (згідно Rel. 15) базується на програмно-конфігурованій мережі радіодоступу SDR (Software Defined Radio) та опорній мережі SDN (Software Defined Networking) і використовує процедури віртуалізації мережних функцій, а для підтримки характеристик QoE різних груп послуг використовує технологію Network Slicing [1-2]. Вона дозволяє виконувати створення топологічної конфігурації мережі для різних умов надання послуг. При цьому важливим питанням реалізації Network Slicing є можливість визначення характеристик якості QoE, таких як: час затримки пакетів, пропускна спроможність та ймовірності втрат пакетів. Рішення цієї задачі ускладнюється динамічністю мережі та складною архітектурою її побудови. Також при розподілі мережі на підмережі частина фізичних ресурсів може відноситися до декількох підмереж одночасно і не дозволяє отримати значення характеристик QoE за допомогою відомих математичних методів. Це потребує пошуку рішення, яке дозволить одночасно розглядати вихідну структуру мережі, її поділ на підмережі, враховувати характеристик QoE та їхні зміни на границях підмереж.

Метою роботи є дослідження середнього часу затримки пакетів в мережі 5G/NR з використанням тензорного контурного методу на основі декомпозиції.

Огляд літератури в дослідженнях процедур реалізації Network Slicing дозволяє стверджувати про значний інтерес авторів до цієї теми та пошуку математичних рішень цієї задачі. Розглянемо декілька робіт. В роботі авторів [3] для знаходження характеристик якості трафіку в мережі було використано апарат теорії телетрафіку, але структура мережі не враховувалася. В роботі [4] запропоновано методи теорії гри та нечітких множин, які використані для визначення характеристики якості, а саме, часу затримки в мережі складної архітектури. Однак це не дозволяє розглянути архітектуру мережі. Слід зауважити, що розглянуті методи не дозволяють досліджувати як структуру мережі, так і її характеристики одночасно.

В даній роботі пропонується використання тензорного контурного методу дослідження, який дозволяє одночасно досліджувати як структурні, так і функціональні характеристики розглянутої мережі, який запропонований авторами в роботах [5-6]. Аналогічно [7], розглянемо складну архітектуру мережі 5G/NR за допомогою методу декомпозиції.

Дослідження

Розглянемо фрагмент мережі 5G/NR територіально розподіленої структури у вигляді графу $G(N, V)$, який складається з $N = \{N_j, j = \overline{1, 16}\}$ базових станцій, що взаємодіють за допомогою $V = \{V_i, i = \overline{1, 26}\}$ трактів передачі. Для цієї мережі розглянемо декомпозицію з використанням тензорного контурного методу шляхом розподілу на $k = 4$ підмереж. У даній роботі буде досліджено одну з характеристик QoE – середній час затримки пакетів.

Необхідно знайти:

- значення середнього часу затримки пакетів T_{rk} (мс) в контурах кожної підмережі, де $k = \overline{1,4}$;
- значення середнього часу затримок T_{zpvqk} (мс) пакетів в граничних гілках кожної підмережі, які утворилися на перетині підмереж при розділенні мережі на під мережі, $k = \overline{1,4}$;
- значення середнього часу затримки пакетів T_{zpmvq} (мс) в граничних гілках для мережі в цілому, де $q = \overline{1,8}$.

Відомо:

- значення середнього часу затримки пакетів T_{vk} в трактах взаємодії між базовими станціями кожної підмережі (мс), $k = \overline{1,4}$:

$$\begin{aligned}
 T_{v1} &\approx \begin{pmatrix} 0,011 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,043 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,015 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,033 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,014 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,001 \end{pmatrix}, \\
 T_{v2} &\approx \begin{pmatrix} 0,017 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,042 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,025 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,008 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,036 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,017 \end{pmatrix}, \\
 T_{v3} &\approx \begin{pmatrix} 0,013 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,017 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,031 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,004 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,028 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,013 \end{pmatrix},
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$T_{v_4} \approx \begin{pmatrix} 0,011 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,022 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,045 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,013 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,014 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,007 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,015 \end{pmatrix}.$$

— граф мережі рис. 1.

Рис. 1. Фрагмент мережі 5G/NR

Розділимо фрагмент заданої мережі (рис. 1) на чотири окремих підмережі. Після розділення на перетині підмереж утворились об'єкти, які відносяться до декількох підмереж одночасно – це тракти взаємодії, базові станції та об'єднуючі їх тракти. Будемо називати їх граничними. Тоді на графі мережі буде вісім граничних гілок v_{zp_q} , $q = \overline{1,8}$ ($v_{zp_1}, v_{zp_2}, v_{zp_3}, v_{zp_4}, v_{zp_5}, v_{zp_6}, v_{zp_7}, v_{zp_8}$), 14 граничних контурів r_g , такі як $r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_8, r_9, r_{10}, r_{11}, r_{12}, r_{14}, r_{15}, r_{17}, r_{19}$. В першу підмережу входять граничні контури r_2, r_3, r_4, r_5 , в другу – r_6, r_8, r_9, r_{10} , в третю – $r_{11}, r_{12}, r_{14}, r_{15}$, а в четверту – r_{17}, r_{19} , відповідно. Граничні гілки v_{zp_1} ,

v_{ep_2}, v_{ep_3} входять в першу та в другу підмережу, v_{ep_4} – в першу та третю підмережу, v_{ep_5} та v_{ep_6} входять в другу та третю, v_{ep_7} та v_{ep_8} входять в третю та четверту підмережу.

Для розподіленої мережі запишемо базисні матриці перетворень B_k , де $k = \overline{1,4}$ для кожної з підмереж, згідно з рис. 1 та заданих напрямків передачі трафіку. При формуванні базисних матриць B_k враховуємо, що вони описують відношення між контурами кожної підмережі та граничними гілками цієї підмережі. Позначимо елементи стовпців цієї матриці, як номери контурів підмережі, а строки – номери гілок цієї підмережі. Елементи матриць B_k , де $k = \overline{1,4}$, можна розрахувати згідно [8]:

$$b_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{якщо } v_i \in r_j, \text{ та напрямок тракту } v_i \text{ співпадає з напрямком контуру } r_j; \\ -1, & \text{якщо } v_i \in r_j, \text{ та напрямок тракту } v_i \text{ не співпадає з напрямком контуру } r_j; \\ 0, & \text{якщо } v_i \notin r_j. \end{cases} \quad (2)$$

де b_{ij}^k – відповідні елементи матриць B_k , де $k = \overline{1,4}$.

Для розглянутої мережі (рис. 1) базисні матриці B_k мають вигляд (3)

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad B_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$B_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad B_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Для знаходження середнього часу затримки пакетів T_{rk} кожної підмережі скористаємось формулою [5-6]:

$$T_{rk} = B_k^t T_{vk} B_k \quad (4)$$

де B_k – базисна матриця перетворень, яка визначає відношення між контурами кожної підмережі та граничними гілками цієї підмережі, T_{vk} – значення середнього часу затримки пакетів в трактах кожної підмережі, t – знак транспонування.

Знайдемо значення середнього часу затримки пакетів T_{rk} в контурах кожної підмережі, використовуючи формулу (4), базисну матрицю перетворень (3) та відомі значення середнього часу затримки в трактах мережі (1). Результати обчислень зведемо в табл.1.

Таблиця 1

Значення середнього часу затримки пакетів T_{rk} в контурах кожної підмережі, мс

Підмережа 1		Підмережа 2		Підмережа 3		Підмережа 4	
τ_{r1}	0,058	τ_{r6}	0,059	τ_{r11}	0,044	τ_{r16}	0,036
τ_{r2}	0,058	τ_{r7}	0,084	τ_{r12}	0,035	τ_{r17}	0,027
τ_{r3}	0,048	τ_{r8}	0,033	τ_{r13}	0,045	τ_{r18}	0,08
τ_{r4}	0,039	τ_{r9}	0,044	τ_{r14}	0,045	τ_{r19}	0,033
τ_{r5}	0,026	τ_{r10}	0,036	τ_{r15}	0,013	–	–

Розглянемо граф мережі за допомогою базисних матриць $A_k^{(l)}$, що визначають опис кожної підмережі, де $k = \overline{1,4}$, $l = \overline{1,3}$. $A_k^{(1)}$ – матриці елементи яких, визначають відношення між контурами та граничними контурами; $A_k^{(2)}$ – матриці елементи яких, визначають відношення між граничними контурами та граничними гілками; $A_k^{(3)}$ – матриці елементи яких, визначають відношення між граничними гілками підмережі та усіма граничними гілками мережі. Елементи матриць A_k , де $k = \overline{1,4}$, можна розрахувати за формулами [8]:

$$a_{mg}^{(1)} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } r_m = r_g; \\ 0, & \text{якщо } r_m \neq r_g \end{cases}, a_{zpk_qg}^{(2)} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } v_{zpk_q} \in r_g; \\ 0, & \text{якщо } v_{zpk_q} \notin r_g \end{cases},$$

$$a_{zpk_qzpq}^{(3)} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } v_{zpk_q} \in v_{zpq}; \\ 0, & \text{якщо } v_{zpk_q} \notin v_{zpq} \end{cases},$$
(5)

де $a_{mg}^{(1)}$, $a_{zpk_qg}^{(2)}$, $a_{zpk_qzpq}^{(3)}$ – відповідні елементи матриць, r_m – контури підмережі, r_g – граничні контури підмережі, v_{zpk_q} – граничні гілки, що входять в підмережу, v_{zpq} – усі граничні контури мережі.

Запишемо матриці $A_k^{(1)}$, $A_k^{(2)}$, $A_k^{(3)}$ для кожної підмережі:

$$A_1^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, A_2^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, A_3^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, A_4^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

$$A_1^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, A_2^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, A_3^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$A_4^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$A_1^{(3)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, A_2^{(3)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$A_3^{(3)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, A_4^{(3)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для визначення середнього часу затримки для граничних гілок T_{cpvk} кожної підмережі, знайдемо матрицю A_k , яка описує кожну підмережу у відповідності до граничних контурів та гілок, та визначається за формулою:

$$A_k = A_k^{(1)} \cdot A_k^{(2)} \cdot A_k^{(3)} \quad (9)$$

де $k = \overline{1,4}$.

Тоді базисні матриці A_1 , A_2 , A_3 , A_4 мають вигляд:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, A_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Знайдемо середній час затримки пакетів для граничних гілок T_{zpvqk} кожної підмережі за формулою:

$$T_{zpvk} = A_k^t \cdot T_{rk} \cdot A_k + T_{zpk} \quad (11)$$

де A_k – матриця, яка описує кожну підмережу у відповідності до граничних контурів та гілок, T_{rk} – середній час затримки пакетів кожної підмережі, T_{zpk} – вихідні значення затримок в граничних гілках, t – знак транспонування.

Для знаходження середнього часу затримки пакетів для граничних гілок T_{zpvqk} кожної підмережі використовуємо формулу (11). Базисні матриці, що описують кожну підмережу у відповідності до граничних контурів та гілок (10). Значення середнього часу затримки пакетів кожної підмережі задані у табл. 1. Вважаємо, що вихідні значення затримок в граничних гілках $T_{zpk} = 0$, тобто обслуговування потоку трафіку в граничних гілках відбувається без затримок. Результати розрахунків зведені в табл. 2.

Для знаходження середнього часу затримки пакетів T_{zpmvq} в граничних гілках мережі використовуємо формулу:

$$T_{zpmvq} = T_{zpvq1} + T_{zpvq2} + T_{zpvq3} + T_{zpvq4} \quad (12)$$

де T_{zpvqk} – значення середнього часу затримок пакетів в граничних гілках кожної підмережі, де $k = \overline{1,4}$.

Таблиця 2

Значення середнього часу затримок T_{zpvqk} пакетів в граничних гілках кожної під мережі

5G/NR, мс

Підмережа 1							
τ_{v1}	τ_{v2}	τ_{v3}	τ_{v4}	τ_{v5}	τ_{v6}	τ_{v7}	τ_{v8}
0,058	0,048	0,039	0,026	—	—	—	—
Підмережа 2							
τ_{v1}	τ_{v2}	τ_{v3}	τ_{v4}	τ_{v5}	τ_{v6}	τ_{v7}	τ_{v8}
0,059	0,044	0,036	—	0,033	0,036	—	—
Підмережа 3							

τ_{v1}	τ_{v2}	τ_{v3}	τ_{v4}	τ_{v5}	τ_{v6}	τ_{v7}	τ_{v8}
—	—	—	0,013	0,044	0,035	0,013	0,045
Підмережа 4							
τ_{v1}	τ_{v2}	τ_{v3}	τ_{v4}	τ_{v5}	τ_{v6}	τ_{v7}	τ_{v8}
—	—	—	—	—	—	0,027	0,033

Знайдемо середній час затримки пакетів $T_{\text{зрмвq}}$ в граничних гілках мережі використовуючи вираз (12) та значення середнього часу затримок $T_{\text{зрвqk}}$ пакетів в граничних гілках кожної підмережі 5G/NR (табл. 2). Результати розрахунків зведені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунків часу затримки пакетів $T_{\text{зрмвq}}$ в граничних гілках мережі, мс

$\tau_{\text{зрмв1}}$	$\tau_{\text{зрмв2}}$	$\tau_{\text{зрмв3}}$	$\tau_{\text{зрмв4}}$	$\tau_{\text{зрмв5}}$	$\tau_{\text{зрмв6}}$	$\tau_{\text{зрмв7}}$	$\tau_{\text{зрмв8}}$
0,117	0,092	0,075	0,039	0,077	0,071	0,04	0,078

Висновки

Наведений приклад визначення характеристик якості мережі 5G/NR та організованих підмереж з використанням тензорного контурного методу на основі декомпозиції дозволяє отримати значення часу затримки пакетів для вихідної мережі в цілому, виділених підмереж та граничних об'єктів мережі. На практиці використання отриманих результатів можливе, наприклад для проектування та подальшої експлуатації мережі e-health, коли виконується вибір топології мережі та характеристик обладнання. Тоді для мережі 5G/NR складної топології та архітектури можливо використати розподіл мережі на підмережі з метою спрощення розрахункового спектру знаходження характеристик якості усієї системи. Це дозволить для кожної групи послуг з'єднання з наднизькою затримкою URLLC отримати необхідні значення часу затримки пакетів за допомогою тензорного контурного методу на основі декомпозиції шляхом одночасного розгляду мережі та її поділу на підмережі, та враховувати характеристики QoE мережі, а також їхні зміни на границях підмереж. Тобто таким чином нами розглянуто процес підвищення однієї з характеристик якості мережі 5G/NR на базі методу декомпозиції з меншою кількістю обчислювальних операцій.

Література

1. 3GPP "Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies", ETSI TR 38.913, V14.3.0, 2017. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138913/14.02.0060/tr_138913v140200p.pdf
2. METIS-II project ("Mobile and wireless communications Enablers for

- Twenty-twenty (2020) Information Society II"), see <https://5gpp.eu/metis-ii/>
3. Han B., Sciancalepore V., Costa-Pérez X., Feng D., Schotten H.D. Multiservice-based Network Slicing Orchestration with Impatient Tenants, arXiv:1909.04585v1 [cs.NI] 6 Sep 2019.
 4. D'Oro S., Restuccia F., Melodia T., Palazzo S. Low-Complexity Distributed Radio Access Network Slicing: Algorithms and Experimental Results, IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018.
 5. Стрелковская И.В. Тензорная модель исследования сети массового обслуживания // И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская // Цифрові технології. Збірник наукових праць. – 2010. – Вип. 7. – С. 81-89.
 6. Стрелковская И.В. Тензорный анализ качественных характеристик сети массового обслуживания // И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская // Збірник наукових праць ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – Вип. 2. – С. 20-25.
 7. Стрелковская И.В. Исследование характеристик качества систем сложной структуры с применением тензоров на основе декомпозиции [Электронный ресурс] / И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская, Г.Г. Смаглюк // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 3(8). – С. 47-57. http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123_strelkovska_tensor.pdf.
 8. Стрелковська І.В. Дискретна математика // І.В. Стрелковська, А.Г. Буслаєв, О.М. Харсун // Навчальний посібник. – 2010. – С. 70.

References

1. 3GPP "Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies", ETSI TR 38.913, V14.3.0, 2017. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138913/14.02.0060/tr_138913v140200p.pdf
2. METIS-II project ("Mobile and wireless communications Enablers for
3. Twenty-twenty (2020) Information Society II"), see <https://5gpp.eu/metis-ii/>
4. Han V., Sciancalepore V., Costa-Perez X., Feng D., Schotten H.D. Multiservice-based Network Slicing Orchestration with Impatient Tenants, arXiv:1909.04585v1 [cs.NI] 6 Sep 2019.
5. D'Oro S., Restuccia F., Melodia T., Palazzo S. Low-Complexity Distributed Radio Access Network Slicing: Algorithms and Experimental Results, IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018.
6. Strelkovskaya I.V. Tenzornaya model issledovaniya seti massovogo obsluzhivaniya // I.V. Strelkovskaya, I.N. Solovskaya // Cifrovi tehnologiyi. Zbirnik naukovih prac. – 2010. – Vip. 7. – S. 81-89.
7. Strelkovskaya I.V. Tenzornyj analiz kachestvennyh harakteristik seti massovogo obsluzhivaniya // I.V. Strelkovskaya, I.N. Solovskaya // Zbirnik naukovih prac ONAZ im. O.S. Popova. – 2010. – Vip. 2. – S. 20-25.
8. Strelkovskaya I.V. Issledovanie harakteristik kachestva sistem slozhnoj struktury s primeneniem tenzorov na osnove dekompozicii [Elektronnyj resurs] / I.V. Strelkovskaya, I.N. Solovskaya, G.G. Smaglyuk // Problemi telekomunikacij. – 2012. – № 3(8). – S. 47-57. http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123_strelkovska_tensor.pdf.
9. Strelkovska I.V. Diskretna matematika // I.V. Strelkovska, A.G. Buslayev, O.M. Harsun // Navchalnij posibnik. – 2010. – S. 70.