

УДК 004.415:621.39:510.589

О. В. Ліпчанська

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БЕЗДРОТОВОГО СЕГМЕНТУ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Анотация. В статье описана разработка математической модели сегмента компьютерной системы критического применения для анализа процесса передачи мультимедийных данных с использованием сети 4G. Приведено описание архитектуры сегмента компьютерной системы критического применения, а также особенности передачи мультимедийных данных и управляющих сообщений по физическим восходящим и нисходящим каналам сети 4G. При разработке математической модели беспроводного сегмента был применен принцип декомпозиции, использование которого позволило проанализировать характеристики системы и повысить точность результатов моделирования. Для моделирования процессов применена система массового обслуживания, как наиболее часто используемый математический аппарат при определении пропускной способности сети. В работе проведен анализ вероятности возникновения ошибок при передаче мультимедиа данных в зависимости от интенсивности передаваемых данных при определенном количестве одновременно подключенных мобильных станций к базовой станции.

Ключевые слова: компьютерная система критического применения; сеть 4G; система массового обслуживания.

Анотація. У статті описана розробка математичної моделі сегмента комп'ютерної системи критичного застосування для аналізу процесу передачі мультимедійних даних з використанням мережі 4G. Наведено опис архітектури сегмента комп'ютерної системи критичного застосування, а також особливості передачі мультимедійних даних та керуючих повідомлень по фізичним висхідним і низхідним каналах мережі 4G. При розробці математичної моделі бездротового сегмента був застосований принцип декомпозиції, використання якого дозволило проаналізувати характеристики системи і підвищити точність результатів моделювання. Також були застосовані системи масового обслуговування, як математичний апарат, що найчастіше використовується при визначенні пропускної здатності мережі. У роботі був проведений аналіз залежності ймовірності виникнення помилок при передаванні мультимедіа даних в залежності від інтенсивності даних, що передаються, при заданій кількості одночасно підключених мобільних станцій до базової станції.

Ключові слова: комп'ютерна система критичного застосування; мережа 4G; система масового обслуговування.

Abstract. The article describes the developing of a mathematical model of a mission-critical computer system segment for analyzing the process of multimedia data transferring using 4G network. The architecture of the mission-critical computer system segment is described, as well as the features of multimedia data and control messages transmitting over the physical uplink and downlink channels of the 4G network. When developing the mathematical model of a wireless segment, the decomposition principle was applied. Using of the principle allows to analyze the characteristics of the system and improve the accuracy of simulation results. Also, queuing systems were used, as the most using mathematical device, to determine the network capacity. The paper analyzed the errors probability in the multimedia data transmission, depending on the size of the transmitted frame and the number of simultaneously connected mobile stations to the base station.

Keywords: mission-critical computer system; 4G network; queuing system.

Вступ

З появою нових високопродуктивних комп'ютеризованих засобів, популяризацією мережевих сервісів з переважною часткою аудіо-, фото- та відео даних спостерігається істотне збільшення мультимедійного трафіку. Оскільки переважна кількість пристроїв для використання медіаконтенту – це мобільні пристрої, то вважається, що пріоритетним напрямком реалізації послуг передачі мультимедіа даних буде використання мобільних і обчислювальних засобів. Найближчим часом в Україні планується модернізація обладнання операторів мобільного зв'язку з метою надання послуг доступу до мережі Інтернет з використанням технології 4G на швидкості до 1Гбіт/сек для стаціонарних об'єктів і до 100 Мбіт/сек для об'єктів, які рухаються [1]. Це буде сприяти розвитку таких напрямків, як "інтернет речей", "розумне місто", "розумний будинок", онлайн ТБ високої чіткості, машинно-машинна взаємодія, "мобільне здоров'я" та інших мережевих технологій, що вимагають високої швидкості і меншої затримки передачі даних.

Актуальність

Аналіз літературних джерел показав, що крім технічних аспектів розгортання мережі 4G актуальними є питання зменшення затримок при передаванні даних. Автори пов'язують вирішення цих питань з використанням перспективного стандарту LTE. Однак для адекватної оцінки якості роботи мережі 4G в реальних умовах, оптимізації процесу передавання даних необхідні дослідження і теоретично обґрунтовані рішення (математичні моделі), що визначили б проблеми і дозволили забезпечити необхідний рівень якості передавання мультимедійних даних. Це особливо актуально в комп'ютерних системах критичного застосування. З [2 – 5] відомо, що такі дослідження найчастіше виконуються з використанням систем масового обслуговування для аналізу затримок в складних системах.

Мета

Провести дослідження щодо надійності роботи бездротового сегменту комп'ютерної системи критичного застосування на базі технології 4G в залежності від кількості підключених мобільних станцій.

Визначити залежність ймовірності помилки при передаванні даних від інтенсивності вхідного потоку та кількості підключених мобільних станцій.

Задачі

1. Розробити архітектуру бездротового сегменту комп'ютерної системи критичного застосування на базі технології 4G.
2. Дослідити на математичній моделі сегменту комп'ютерної системи критичного застосування на базі технології 4G впливу кількості одночасно активних мобільних станцій на ймовірність невірної прийому кадру.
2. Визначити залежність ймовірності помилки при передаванні даних з різними значеннями інтенсивності вхідного потоку даних.

Розв'язання задач

Загальна архітектура фрагмента 4G системи передавання даних, що моделюється, представлена на рис. 1. Система складається з однієї базової станції (eNodeB), обслуговуючого шлюзу мережі SGW, який є шлюзом між даним сегментом мобільної мережі й мережами другого й третього покоління того ж оператора, шлюзом PGW, що поєднує даний сегмент з іншими мережами передавання даних, вузлом управління мобільністю мережі зв'язку MME, що займається обробкою сигналізації, переважно пов'язаної з управлінням мобільністю абонентів в мережі, і K однакових мобільних станцій (UE) [6 – 9], передавання даних яких (дані користувача і керуючі повідомлення) забезпечується за допомогою PDSCH та PUSCH фізичних каналів [9 – 11].

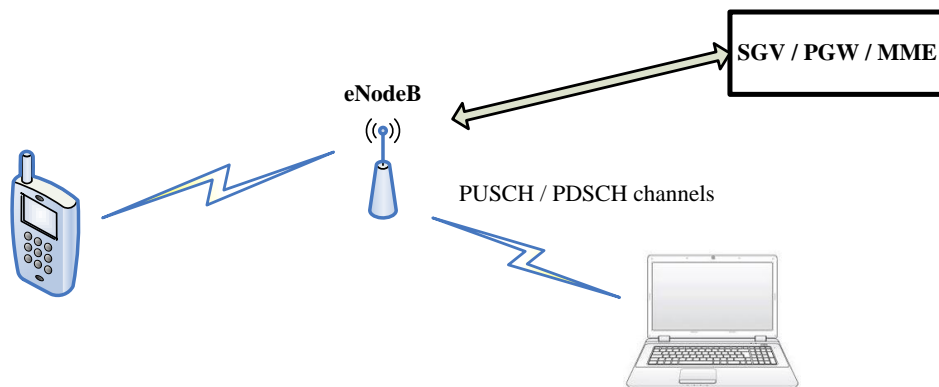


Рисунок 1 – Архітектура промодельованого фрагмента 4G системи передавання даних

Кожна мобільна станція передає потік даних, який розбивається на пакети та має середню інтенсивність λ біт/с. Параметр l_{pk} визначає довжину поля даних пакета. Параметр $l_{fr} = l_{pk} + l_{hd}$ визначає довжину кадру, де l_{hd} – довжина службових полів кадрів. Сформовані кадри розміщуються в буфері мобільної станції для їхньої передачі по каналу й утримуються в ньому до одержання позитивної квитанції. Якщо деякий пакет надходить до мобільної станції, коли буфер заповнений, то йому відмовляється в передаванні, і він губиться. Поведінка системи описується марковським процесом $\pi(t)$ з кінцевим числом станів. Множина $\Omega^\pi = \{S_i^\pi\}$ описує простір станів процесу $\pi(t)$, елементи якого є елементарними станами досліджуваної системи. В якості елементарного стану може бути визначений багатомірний вектор S^π , розмірність якого пропорційна числу мобільних станцій, що ведуть передавання даних. Знайти чисельне рішення рівняння рівноваги процесу $\pi(t)$ є важкою процедурою через розмірність Ω^π і через різномасштабні значення інтенсивностей переходу процесу $\pi(t)$ між його станами. Був використаний принцип декомпозиції досліджуваного фрагмента 4G системи, методом якого обрана декомпозиція процесу функціонування досліджуваної системи за її агрегованими станами. В якості таких станів обрана множина із $(K + 1)$ станів $\hat{\Omega} = \{\hat{S}_k, k = \overline{0, K}\}$, де агрегований стан $\hat{S}_k = \{S_i^\pi \mid S_i^\pi \in \Omega^\pi, z(S_i^\pi) = k\}$ визначається підмножиною простору станів Ω^π процесу $\pi(t)$ таких станів, при перебуванні в яких k мобільних станцій у системі, що моделюється, одночасно ведуть передавання своїх даних.

Для опису процесу займання/звільнення PUSCH каналів мобільними станціями в 4G системі використовуються такі агреговані події: подія e^- – звільнення PUSCH каналу, зайнятого мобільною станцією, подія e^+ – займання PUSCH каналу мобільною станцією для подальшої передачі пакета, що надійшов до неї.

Коли ці події настають, то 4G система переходить із одного агрегованого стану в інший. Агрегований стан \hat{S}_k , $k = \overline{0, K}$, визначається як множина всіх елементарних станів 4G системи, при яких k PUSCH каналів є зайнятими (є k активних мобільних станцій, які ведуть передачу своїх кадрів). У процесі свого функціонування 4G система переходить із агрегованого стану \hat{S}_k в агрегований стан \hat{S}_{k+1} , $k = \overline{0, K-1}$ або із агрегованого стану \hat{S}_k в агрегований стан \hat{S}_{k-1} , $k = \overline{1, K}$, коли події e^+ або e^- мають місце відповідно. На рис.2 наведена діаграма переходів процесу $\pi(t)$ по його станах.

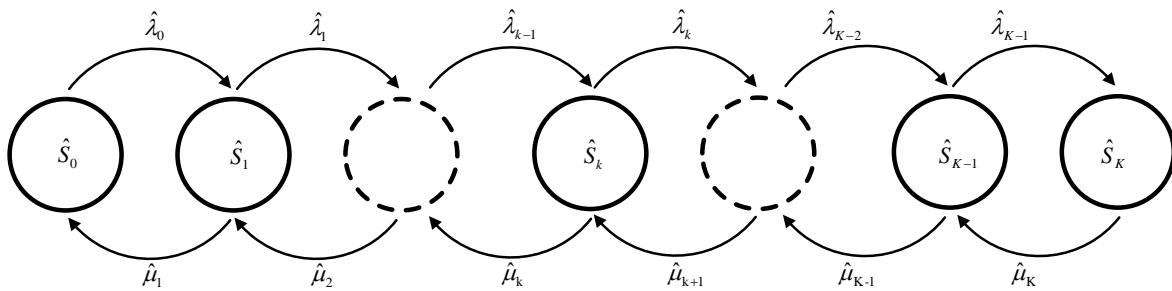


Рисунок 2 – Схема переходів марковського процесу по його станах

Припустимо, що протягом малого інтервалу часу $\Delta t \rightarrow 0$ ймовірність настання двох або більше подій e^- і/або e^+ прагне до нуля й випадкова величина, що визначає інтервал часу між двома послідовними подіями e^+ або двома послідовними подіями e^- , має експоненційний розподіл. Тоді процес займання та звільнення PUSCH каналів в 4G системі описується марковським процесом $\hat{\pi}(t)$ створення/видалення із двома граничними станами \hat{S}_0 і \hat{S}_K і з його інфінітезимальними інтенсивностями переходів $\hat{\lambda}_k$, $k = \overline{0, K-1}$, та $\hat{\mu}_k$, $k = \overline{1, K}$.

Стационарні ймовірності $\hat{\pi}_k$ перебування 4G системи в станах \hat{S}_k , $k = \overline{0, K}$ є ненульовим рішенням системи однорідних лінійних рівнянь (1).

$$\begin{aligned} -\hat{\lambda}_0 \cdot \hat{\pi}_0 + \hat{\mu}_1 \cdot \hat{\pi}_1 &= 0, \\ \hat{\lambda}_{k-1} \cdot \hat{\pi}_{k-1} - (\hat{\lambda}_k + \hat{\mu}_k) \cdot \hat{\pi}_k + \hat{\mu}_{k+1} \cdot \hat{\pi}_{k+1} &= 0, \quad k = \overline{1, K-1}, \\ \hat{\lambda}_{K-1} \cdot \hat{\pi}_{K-1} - \hat{\mu}_K \cdot \hat{\pi}_K &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Інфінітезимальні інтенсивності створення $\hat{\lambda}_k$ і видалення $\hat{\mu}_k$ для процесу $\hat{\pi}(t)$ визначаються наступними виразами:

$$\hat{\lambda}_k = (K - k) \cdot \lambda \cdot (l_{pk})^{-1}, \quad k = \overline{0, K-1}, \quad \hat{\mu}_k = k \cdot \tilde{\mu}_k, \quad k = \overline{1, K}, \quad (2)$$

де $\hat{\lambda}_k$ визначається як інтенсивність займання чергового PUSCH каналу за умови, що k інших PUSCH каналів є зайнятими передаванням даних, а $\hat{\mu}_k$ визначається як інтенсивність визволення деякого PUSCH каналу за умови, що k таких каналів є зайнятими передаванням даних.

Процес передавання даних по PUSCH каналу представлений моделлю, що описує функціонування PUSCH каналу й оцінює його ймовірсно-часові характеристики за умови, що \bar{k} мобільних станцій одночасно здійснюють передавання кадрів. Вона описує поведінку 4G системи передавання даних на інтервалі часу, протягом якого вона перебуває в агрегованому стані \hat{S}_k . Була використана замкнута однорідна система обслуговування, рис. 3, де $Q_i, i = \overline{0, 6}$ позначаються вузли системи, а $E_j, j = \overline{0, 10}$ – події, що мають місце при передаванні даних по PUSCH каналу.

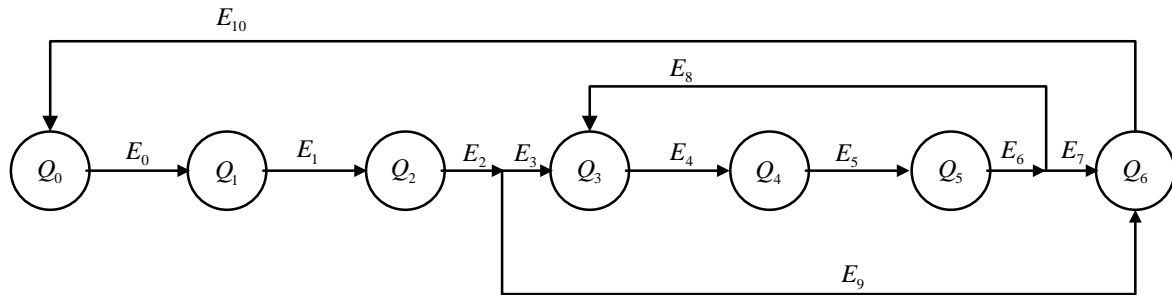


Рисунок 3 – Замкнута однорідна система обслуговування

Результати моделювання бездротового сегменту комп'ютерної системи критичного застосування на базі технології 4G наведені на рис. 4, 5. Ці результати були отримані при таких значеннях параметрів, як максимальне число мобільних станцій у соті $K=200$ та середній розмір інформаційного пакета – $l_{fr}=500$ біт, інші параметри були обрані із відповідністю до [12 – 14].

На рис. 4 представлена залежність інтенсивності вхідного потоку даних λ від середнього числа \bar{k} активних мобільних станцій для розміру пакета $l_{fr}=500$ біт, з якого видно, як зростає інтенсивність потоку даних при збільшенні абонентів у мережі.

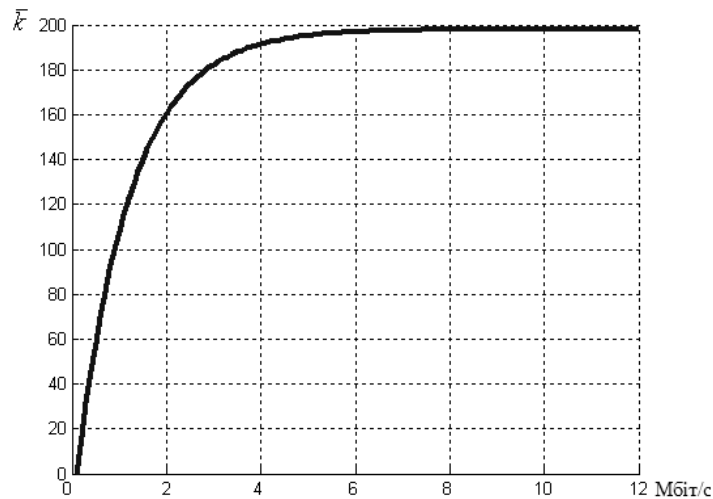


Рисунок 4 – Залежність інтенсивності вхідного потоку від кількості активних станцій

На рис. 5 представлені ймовірності $\hat{\pi}_k$ помилкового прийому пакету для різних значень інтенсивності потоку даних $\lambda = 120$ кбіт/с, 240 кбіт/с, 480 кбіт/с, 960 кбіт/с, 1,4 Мбіт/с, 1,8 Мбіт/с, 2,9 Мбіт/с, 3,4 Мбіт/с, 4,8 Мбіт/с, 5,6 Мбіт/с, 6,4 Мбіт/с, 12 Мбіт/с при значенні довжини кадру 500 біт.

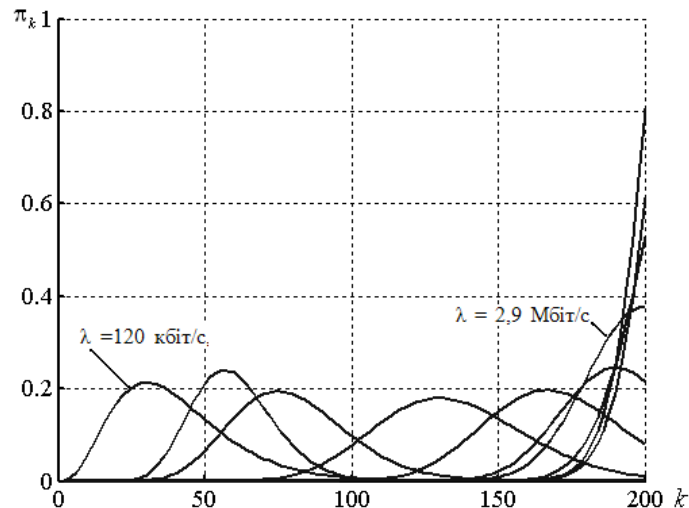


Рисунок 5 – Ймовірність помилки при різних інтенсивностях вхідного потоку даних

Висновки

1. В результаті розроблено архітектуру бездротового сегменту комп'ютерної системи критичного застосування на базі технології 4G та її математичну модель на основі принципу декомпозиції системи по її агрегованих станах.

2. При моделюванні сегмента комп'ютерної системи критичного застосування отримані результати, які узгоджуються з результатами аналітичного і імітаційного моделювання подібних систем [15]. Отримані результати показують, що ефективне використання комп'ютерних систем критичного застосування на основі 4G мережі при передаванні мультимедійних даних можливо, якщо інтенсивність вхідного потоку даних $\lambda \leq 2,9$ Мбіт / с і числі активних станцій $K < 200$. При збільшенні інтенсивності вхідного потоку ймовірність помилкового прийому кадру зростає та наближується до 1. У цьому випадку базова станція буде приймати більшість кадрів з помилками, і 4G система передавання даних буде не здатна функціонувати.

3. Отримані результати дають можливість оцінити, при яких значеннях інтенсивності вхідного потоку даних і числі активних станцій, що використовують одну смугу частот, доцільно використання сегмента комп'ютерної системи критичного застосування для передачі мультимедійних даних.

Список літератури

1. Про затвердження плану заходів щодо впровадження системи рухомого (мобільного) зв'язку четвертого покоління [Електроний ресурс] – Єдиний веб-портал органів виконавчої влади України, 2015. – №. 1232-р. – Режим доступу до постанови: <http://www.kmu.gov.ua/control/uk/cardnpd?docid=248668298>. – (Нормативний документ Кабінету Міністрів України).

2. Матвеев В. Ф. Системи масового обслуговування / В. Ф. Матвеев, В. Г. Ушаков. – М.: МДУ, 1984. – 240 с.

3. Конов А. Л. Методи розрахунку показників продуктивності мереж ЕОМ з неоднорідним трафіком: монографія / А. Л. Конов, Ю. А. Ушаков // Оренбурзький держ. ун-т – Оренбург: ОДУ, 2013. – 139 с.

4. Ремицька А. Я. Марковські процеси і найпростіші моделі теорії масового обслуговування. Комп'ютерне моделювання найпростіших моделей масового обслуговування / А. Я. Ремицька, І. А. Сусліна // Науково-технічний вісник інформаційних технологій, механіки й оптики. – С-Пб: ІТМО, 2007. – С. 239-248.

5. Лукьянов В. С. Моделювання мережі коміркового зв'язку / В. С. Лукьянов, К. О. Сотніков // Вісті Волгоградського державного технічного університету, 2004. – С. 55-58

6. Gelgor A. L. LTE Mobile Data Transfer Technology / A. L. Gelgor, E. A. Popov. Publishing house of Polytechnic University, 2011. – 204 p.

7. Fritze M. Sc. SAE – The Core Network for LTE / M. Sc. Fritze. Ericsson Austria GmbH, 2008.

8. Beming P. LTE-SAE architecture and performance / P. Beming, L. Frid. Ericsson, 2007.

9. Дальман Е. Радіо-інтерфейс LTE в деталях / Е. Дальман, А. Фурускар, І. Ядінг. – М.: Мережі й Системи зв'язку, 2008.

10. LTE Communication Channels [Електроний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_communication_channels.htm;

11. Ghosh A. Designing a Broadband Wireless Network: Overview and Channel Structure of LTE / Arunabha Ghosh, Jeffrey G. Andrews, Rias Muhamed, Jun Zhang. Prentice Hall, 2010.

12. Loshakov V. A. Adaptive modulation in LTE technology by using OFDMA and SC-FDMA with MIMO / V. A. Loshakov, H. D. Al-Janabi, Y. T. Hussein, N. T. Nasi // Eastern European Journal of Advanced Technology, 2013. – Vol. 2/9 (62), P. 8-11.

13. LTE – the UMTS long term evolution: from theory to practice. Great Britain, Chippenham, Wiltshire: John Wiley & Sons Ltd, 2011. – 753 p.

14. Bazit A. Calculation of LTE networks / Abdul Bazit. – Helsinki University of Technology, 2009.

15. Sovetov B. L. Modeling of systems. / B. L. Sovetov, S. A. Yakovlev. Moscow: Higher School Publishing House. The third edition, 2001. – 343 p.

Стаття надійшла: 13.11.2017.

Відомості про авторів

Ліпчанська Оксана Валентинівна – аспірант, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", кафедра обчислювальної техніки та програмування, Україна, Харків.