

СТАНОВИЩЕ

върху дисертационен труд за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Автор на дисертационния труд: маг. инж. Георгиос

Курумтзидис

Тема на дисертационния труд: Подобряване качеството на възприятие в безжични мрежи от следващо поколение чрез машинно обучение

Член на научното жури: проф. д-р инж. Станимир

Садинов

**1. Актуалност на разработвания в дисертационния труд проблем в научно и научноприложно отношение.**

Темата за прилагане на безжични мрежи за подобряване качеството на изживяването (QoE) е актуална и интересна. Бъдещите безжични мрежи (FWN) трябва да поддържат непрекъснато развиващите се и разнообразни нужди от свързаност на нововъзникващите вертикални индустрии в областта на медиите и развлеченията, здравеопазването, производството, автомобилостроенето, енергетиката, интернет на нещата (IoT), околната среда и обществената безопасност. Такава широка и хетерогенна гама от услуги и устройства изисква разработването на гъвкави и мащабируеми мобилни мрежи, които са в състояние да отговорят на различните изисквания за качество на услугата (QoS), за да осигурят задоволителни нива на качество на изживяването (QoE).

В научно-приложно отношение в дисертационния труд са решени множество задачи, свързани с разработка на цялостна методология за подобряване на QoE в FWN чрез интегриране на изкуствен интелект (AI) в мрежовите операции за оптимизиране на тяхната производителност. Мрежовите операции, базирани на изкуствен интелект, са интегрирани в Open RAN архитектурата, за да поддържат различни случаи на употреба с хетерогенни изисквания за QoS по отношение на честотна лента, латентност, загуба на пакети и трептене. Представени са разработени алгоритми за машинно обучение (ML), за да осигурят автоматизирано прогнозиране на мрежовия трафик и оптимално разпределение на ресурсите. Предложените методики стъпват със съвременни концепции и подходи в машинното обучение, разпознаването и класификацията.

**2. Степен на познаване състоянието на проблема и творческа интерпретация на литературния материал.**

Дисертационният труд включва благодарности на автора, съдържание, списъци на фигури, таблици, на съкращения, на означения, въведение, десет глави за решаване на формулираните основни задачи и заключение, авторски публикации по дисертационните изследвания, списък на цитиранията и използвана литература, която съдържа 440 научни източника. В дисертационния труд са цитирани и 8 публикации на докторантът, чрез които получените резултати са станали достояние на научната общност. Всички литературни източници са подбрани така, че да отразяват съвременните научни достижения в областта на тематиката на дисертационния труд. Цитирани са статии от авторитетни научни списания, конференции и книги. Извършеният аналитичен обзор позволява на докторантът да дефинира коректно целта и основните задачи за изследване, които той решава успешно в отделните глави.

### **3. Съответствие на избраната методика на изследване и поставената цел и задачи на дисертационния труд с постигнатите приноси.**

Методите за изследване са обособени основно в отделните глави, като симулационни и експериментални. Представен е цялостен анализ на оценката на QoE за мултимедийни услуги, ориентирани към приложението, със специален фокус върху приложенията за виртуална реалност и видео стрийминг на игри. В този контекст е предоставена дефиницията на QoE за мултимедийни услуги и са анализирани трите етапа на управление на QoE. Освен това е представена класификация и анализ на най-важните показатели за качество по отношение на субективна и обективна оценка на QoE, както и изследване на методологиите за оценка на тяхната работа и математическите модели за корелиране на параметрите на QoS със стойностите на QoE. Резултатите са разтълкувани и са допринесли за съставянето на модели, методи и подходи за решения при обработка на информацията, като дисертацията подчертава значението на ML за разработването на ефективни модели за прогнозиране на QoE и представя описание и класификация на техниките и методологиите на ML в контекста на безжичните комуникационни мрежи и анализ на принципа на работа на неговите по-важни алгоритми.

В дисертационния труд е представен анализ на методологията за интегриране на оптимизационни модели, базирани на AI/ML, в Open RAN архитектура и практическо ръководство за разработването на xApps. Ориентираната към приложението оптимизация на работата на мрежата изисква разработването на ML алгоритми за прогнозиране на QoE. За тази цел се предлага обективен модел за прогнозиране на QoE за VR 360-градусов видео стрийминг, базиран на енкодер-декодер LSTM. Моделът за прогнозиране е тестван на тестова площадка Open RAN и е доказано, че може да определи количествено в реално време влиянието на работата на безжичната мрежа върху качеството на VR видео, чрез прогнозиране на стойността на QoE с използването на количествено измерими параметри на QoS.

### **4. Приноси на дисертационния труд.**

Приносите са представени под формата за заключение, като подчертавам по съществената част от тях: Предложеният модел за прогнозиране превъзхожда най-съвременните модели от клас CNN, тъй като има по-висока точност на прогнозиране и е идеален за приложения за прогнозиране в реално време, тъй като работи ефективно с малки последователности от данни. Това е първото проучване, което представя сравнителен анализ на DNN алгоритми от класа CNN за прогнозиране на QoE в приложения за стрийминг на видео игри. Разработен и оценен модел за прогнозиране на QoE за стрийминг на видео игри в безжична мрежа, базирана на Open RAN технология. Представен е нов модел за прогнозиране на трафика на мобилна мрежа, базиран на алгоритъма TFT, е разработен за справяне с предизвикателствата, присъщи на прогнозирането на мрежовия трафик.

Тезата също така представя нов подход за динамично разпределение на мрежови ресурси, базиран на оптимизация на QoE и техники за дълбоко подсилване на обучение. Предложеният модел за разпределяне на ресурси се оценява сравнително спрямо установените техники за планиране на ресурси. Извършва се и цялостно проучване на влиянието на мрежовите QoS параметри върху нивото на QoE на безжичните VR комуникации. Освен това е представена нова стратегия за оптимизиране на споделянето на спектъра за подобряване на QoE на VR конферентни видео стрийминг приложения.

В обобщение, дисертацията свързва теорията и практиката, като допринася за безпроблемното предоставяне на висококачествени безжични мултимедийни комуникации, като отбелязва важните стъпки в областта на подобряването на QoS, чрез интегриране на ML алгоритми и Open RAN архитектура.

#### 5. Преценка на публикациите по дисертационния труд.

По темата на дисертацията са представени 8 научни публикации, като 5 от тях са публикувани в реферирани международни списания, 3 са в международни конференции и симпозиуми. Всички публикации са в съавторство с научния и ръководител и колектив. В тях са публикувани и са станали достояние на научната общност голяма част от резултатите на проведените аналитични, симулационни и практически експерименти, представени в дисертацията. От направена справка към момента за докторантът в популярните световни бази данни установих, че публикациите свързани с дисертационния труд са отразени в бази данни на Scopus, като е констатирано към момента 44 техни цитирания, като „Хирш“ фактора за цитиране е  $h=3$  (без самоцитиране).

Всичко това ми дава основание да заявя, че научните постижения на автора са огласени достатъчно широко и са известни у нас и в чужбина.

#### 6. Мнения, препоръки и бележки.

Считам, че дисертационният труд постига заявената цел, а дефинираните задачи са изпълнени на високо научно ниво и дисертацията има завършен характер. Лека критика изразявам в липсата на самостоятелна публикация и според мен, прекалено големия обем на дисертацията и брой отразени използвани литературни източници по тази интересна и актуална тематика. Би било добре да се оформят в края на дисертационния труд научни, научно-приложни и приложни приноси, вместо предложеното заключение. Препоръчвам в бъдеще докторантът да продължи научноизследователската си работа съвместно с колегите от ТУ София, като получените резултати да бъдат представени и публикувани в международни конференции и в реферирани списания с „импакт“ фактор (WoS) или Scopus ранг.

#### 7. Заключение с ясна положителна или отрицателна оценка на дисертационния труд.

Считам, че представеният дисертационен труд **отговаря** на изискванията на Закона за развитие на академичния състав в Република България и оценката ми за него е напълно **положителна**. Постигнатите резултати ми дават основание **да предлага** да бъде придобита образователната и научна степен „доктор“ от инж. Георгиос

**: Куюмтзидис**

в област на висше образование - 5. Технически науки,  
професионално направление - 5.3 „Комуникационна и компютърна техника“,  
докторска програма - „Комуникационни мрежи и системи“.

Дата: 17.04.2024 г.

ЧЛЕН НА ЖУРИТО: [REDACTED]

(проф. д-р инж. Станимир Садинов)

07238-НС1-083  
17.04.2024г.



## OPINION

on a dissertation work for the acquisition of an educational and scientific degree "doctor"  
Author of the dissertation: **mag. Eng. Georgios Kougiumtzidis, M.Sc.**

Dissertation topic: **Machine Learning for QoE Enhancement in Future Wireless Networks**  
Member of the scientific jury: **Prof. Stanimir Sadinov, PhD**

### **1. Relevance of the problem developed in the dissertation work in scientific and scientific applied terms.**

The topic of applying wireless networks to improve the quality of experience (QoE) is current and interesting. Future wireless networks (FWNs) must support the ever-evolving and diverse connectivity needs of emerging vertical industries in media and entertainment, healthcare, manufacturing, automotive, energy, Internet of Things (IoT), environment and public safety. Such a wide and heterogeneous range of services and devices requires the development of flexible and scalable mobile networks that are able to meet different quality of service (QoS) requirements to provide satisfactory quality of experience (QoE) levels.

In a scientific-applied sense, the dissertation has solved numerous tasks related to the development of a comprehensive methodology for improving QoE in FWN by integrating artificial intelligence (AI) in network operations to optimize their performance. AI-based network operations are integrated into the Open RAN architecture to support diverse use cases with heterogeneous QoS requirements in terms of bandwidth, latency, packet loss, and jitter. Developed machine learning (ML) algorithms are presented to provide automated network traffic prediction and optimal resource allocation. The proposed methodologies are in step with modern concepts and approaches in machine learning, recognition and classification.

### **2. Degree of knowledge of the state of the problem and creative interpretation of the literary material.**

The dissertation work includes thanks to the author, table of contents, lists of figures, tables, abbreviations, notations, introduction, ten chapters to solve the formulated main tasks and conclusion, author's publications on the dissertation research, list of citations and used literature, which contains 440 scientific sources. The dissertation also cited 8 publications of the doctoral student, through which the obtained results became known to the scientific community. All literary sources have been selected in such a way as to reflect modern scientific achievements in the field of the subject of the dissertation work. Articles from authoritative scientific journals, conferences and books are cited. The performed analytical overview allows the doctoral student to correctly define the goal and the main research tasks, which he solves successfully in the individual chapters.

### **3. Correspondence of the chosen research methodology and the set goal and tasks of the dissertation with the contributions achieved.**

The research methods are mainly distinguished in the individual chapters, such as simulation and experimental. A comprehensive analysis of QoE evaluation for application-oriented multimedia services is presented, with a special focus on virtual reality and game video streaming applications. In this context, the definition of QoE for multimedia services is provided and the three stages of QoE management are analyzed. In addition, a classification and analysis of the most important quality indicators in terms of subjective and objective QoE

evaluation is presented, as well as a study of methodologies for evaluating their performance and mathematical models for correlating QoS parameters with QoE values. The results are interpreted and contributed to the formulation of models, methods and decision approaches in information processing, the thesis highlights the importance of ML for the development of effective QoE prediction models and presents a description and classification of ML techniques and methodologies in the context of wireless communication networks and an analysis of the principle of operation of its more important algorithms.

The thesis presents an analysis of the methodology for integrating AI/ML-based optimization models into an Open RAN architecture and a practical guide to developing xApps. Application-oriented network performance optimization requires the development of ML algorithms for QoE prediction. For this purpose, an objective QoE prediction model for VR 360-degree video streaming based on LSTM encoder-decoder is proposed. The prediction model has been tested on an Open RAN testbed and proven to be able to quantify in real-time the impact of wireless network performance on VR video quality by predicting the QoE value using quantifiable QoS parameters.

#### **4. Dissertation Contributions.**

The contributions are presented in the form of a conclusion, highlighting the essential part of them: The proposed prediction model outperforms the state-of-the-art CNN-class models because it has higher prediction accuracy and is ideal for real-time prediction applications because by working efficiently with small sequences of data. This is the first study to present a comparative analysis of CNN-class DNN algorithms for QoE prediction in video game streaming applications. Developed and evaluated a QoE prediction model for streaming video games in a wireless network based on Open RAN technology. A new mobile network traffic forecasting model based on the TFT algorithm is presented, developed to address the challenges inherent in network traffic prediction.

The thesis also presents a new approach for dynamic network resource allocation based on QoE optimization and deep reinforcement learning techniques. The proposed resource allocation model is evaluated against established resource planning techniques. A comprehensive study of the influence of network QoS parameters on the QoE level of wireless VR communications is also performed. Furthermore, a new spectrum sharing optimization strategy is presented to improve the QoE of VR conferencing video streaming applications.

In summary, the thesis bridges theory and practice, contributing to the seamless provision of high-quality wireless multimedia communications, marking the important steps in the field of QoE improvement, by integrating ML algorithms and Open RAN architecture.

#### **5. Assessment of dissertation publications.**

On the topic of the dissertation, 8 scientific publications are presented, 5 of which are published in refereed international journals, 3 are in international conferences and symposia. All publications are co-authored by the scientific supervisor and team. In them, a large part of the results of the analytical, simulation and practical experiments presented in the dissertation were published and became available to the scientific community. From a search made at the moment for the doctoral student in the popular world databases, I found that the publications related to the dissertation work are reflected in Scopus databases, and 44 of their citations have been found at the moment, with the "Hirsch" factor for citations being  $h=3$  (without self-citation).

All this gives me reason to state that the scientific achievements of the author have been announced widely enough and are known at home and abroad.

## 6. Opinions, recommendations and notes.

I believe that the dissertation achieves the stated goal, the defined tasks are fulfilled at a high scientific level and the dissertation has a completed character. I express a slight criticism in the lack of an independent publication and, in my opinion, the excessively large volume of the dissertation and the number of reflected used literary sources on this interesting and current topic. It would be good to form scientific, scientific-applied and applied contributions at the end of the dissertation, instead of the proposed conclusion. In the future, I recommend that the doctoral student continue his research work together with his colleagues from TU Sofia, and that the obtained results be presented and published in international conferences and in refereed journals with an "impact" factor (WoS) or Scopus rank.

## 7. Conclusion with a clear positive or negative evaluation of the dissertation work.

I believe that the submitted dissertation **meets** the requirements of the Law on the Development of the Academic Staff in the Republic of Bulgaria and my assessment of it is completely **positive**. The achieved results give me the reason **to propose** that the educational and scientific degree "doctor" be acquired by **eng. Georgios Kougiumtzidis,**

in the field of higher education - 5. Technical sciences,  
professional field - 5.3 "Communication and computer technology",  
doctoral program - "Communication networks and systems".

Date: 17.04.2024

MEMBER OF THE JURY: [REDACTED]  
(Prof. Stanimir Sadinov, PhD)