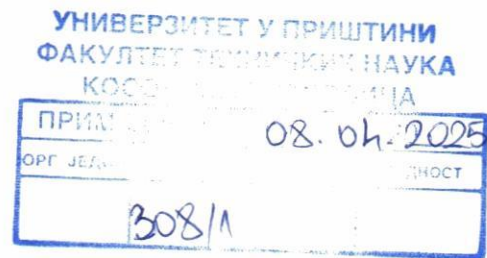


УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ
Бр. 25-201/2
09 APR 2025
ПРИШТИНА

УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
КОСОВСКА МИТРОВИЦА



НАСТАВНО – НАУЧНОМ ВЕЋУ ФАКУЛТЕТА ТЕХНИЧКИХ НАУКА
У КОСОВСКОЈ МИТРОВИЦИ

Предмет: Извештај Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Ненада Станојевића

На основу члана 55. став 1. тачка 16. Статута Факултета техничких наука у Косовској Митровици, а у складу са одредбама Правилника о докторским студијама, Наставно-научно веће Факултета техничких наука у Косовској Митровици, на седници одржаној дана 25.03.2025. године, донело је одлуку под бројем 261/3-7 о именовању Комисије за писање извештаја за преглед, оцену и одбрану урађене докторске дисертације под насловом „Прилог статистичким моделима за анализу перформанси FSO система: нови Chi-square – инверзна Gamma модел и његова примена на хибридни RF/FSO систем са Nakagami-m RF федингом“ кандидата Ненада Станојевића, у саставу:

1. др Петар Спалевић, редовни професор, ФТН Косовска Митровица - председник
2. др Дејан Милић, редовни професор, Електронски факултет Ниш - члан
3. др Ђоко Банђур, редовни професор, ФТН Косовска Митровица – ментор.

На основу увида и анализе предложене документације, Комисија подноси Наставно – научном већу Факултета техничких наука у Косовској Митровици следећи:

ИЗВЕШТАЈ

1.1. Биографски подаци о кандидату

Ненад (Томислав) Станојевић је рођен у Вучитрну 1982. године. Основну школу је завршио у Вучитрну, а гимназију у Лазаревцу. На Факултету техничких наука Универзитета у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици дипломирао је 2012. године, на смеру електроника и телекомуникације, чиме је стекао звање дипломирани инжењер електротехнике.

Докторске академске студије, студијски програм електротехничко и рачунарско инжењерство на Факултету техничких наука Универзитета у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици, уписао је школске 2017/2018. године.

Објавио је 2 (два) рада у научним часописима категорије M23, и 5 (пет) саопштења, штампана у целости, на међународним конференцијама категорије M33.

Област интересовања су му оптичке комуникације у слободном простору (Free Space Optics – FSO), хибридни RF-FSO системи, дигитална обрада фотографије и примена информационих технологија у саобраћају.

Тренутно живи у Београду, а запослен је као наставник вештина на Академији струковних студија косовско метохијској, одсек Урошевац-Лепосавић.

1.2. Верификација научних доприноса

Научни допринос ове докторске дисертације верификован је кроз до сада објављене научне радове који представљају самостални и оригинални научноистраживачки рад кандидата, у којима је презентован део резултата проистеклих из истраживања у оквиру теме докторске дисертације.

До сада објављени радови проистекли из истражовања у оквиру теме докторске дисертације:

1. **Stanojević, N.**, Bandur, Đ., Mosurović, L., Spalević, P., Panić, S. (2024). Exploring a novel turbulence model: the Chi-square/inverse Gamma approach for enhanced Free Space Optics (FSO) communication, *Optica Applicata*, Vol. 54, No. 3, pp.337-351. DOI: 10.37190/oa240305 (M23).
2. **Stanojević, N.**, Bandur, Đ., Šarčević, Đ., Spalević, P., Panić, S. (2024). Statistical modelling of atmospheric turbulence in free-space optical communication systems, In *Sinteza 2024 - International Scientific Conference on Information Technology and Data Related Research*, Singidunum University, pp. 184-190. DOI: 10.15308/Sinteza-2024-184-190 (M33).

1.3. Ostali objavljeni radovi kandidata:

3. **Stanojevic, N.**, Prlincevic, B., Milovanovic, I., Spalevic, P., Stanojevic M., Panic, S. (2021). Performance Analysis of Transmission Visible Watermarked Image over Zero Boresight Double Ricean Turbulence Channel, *Journal of Communications Technology and Electronics*, Vol.66, No.12. DOI: 10.1134/S1064226922020139 (M23).
4. Marković, N., Rajović, J., **Stanojević, N.** (2021). Potential of Use of the Republic of Serbia Renewable Energy Sources. *MENOnet JOURNAL:WORKS in PROGRESS in EMBEDDED COMPUTING (WiPiEC)*, Volume 7, Issue 1, JUNE 2021 (M33).
5. Smilić, M., Milić, D., Nikolić, Z., Spalević, P., & **Stanojević, N.** (2019). Normalized Capacity of Free Space Optical Link in Malaga Channel with Pointing Error using Power and Rate Adaptation Technique. In *2019 14th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)* (pp. 181-184) IEEE (M33).
6. Abdullah, M., Spalević, Ž., Ilić, M., Spalević, P., **Stanojević, N.** (2019). Predlog meteorološke stanice namenjene upotrebi u poljoprivrednog proizvodnji. In *Sinteza 2019-International Scientific Conference on Information Technology and Data Related Research* (pp. 401-409). Singidunum University (M33).

7. Marković, N., Bjelić, S., **Stanojević, N.**, Jovanović B. (2017). Optimizacija parametara izlaznog pasivnog filtra iz PWM invertora. Telekomunikacioni forum, TELFOR 2017, IEEE, 21. i 22. novembar 2017, Sava Center, Beograd, Srbija – saopštenje sa međunarodnog naučnog skupa štampano u celini (M33).
8. Šarčević, Đ., **Stanojević, N.**, Spalević, P., (2023). Calibration of a Piezoresistive Pressure Sensor Using the 2D Progressive Polynomial Method. International Journal of Engineering Inventions, Volume 12, Issue 11, pp: 47-53 (M53).

1.4. Остале публикациије:

1. Бојан Јовановић, **Ненад Станојевић**, *Практикум из компјутерске графике, Академија струковних студија косовско метохијска*, Лепосавић 2025, ISBN-978-86-82074-10-6.

2. ОСНОВНИ ПОДАЦИ О ДИСЕРТАЦИЈИ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под називом „Прилог статистичким моделима за анализу перформанси FSO система: нови *Chi-square* – инверзна *Gamma* модел и његова примена на хибридни RF/FSO систем са *Nakagami-m* RF федингом“ кандидата Ненада Станојевића садржи 135 страна, 67 слика, 13 табела и 119 литературних навода новијег датума. По форми и структури докторска дисертација одговара општим правилима дефинисаним Статутом и Правилником о докторским студијама Факултета техничких наука у Косовској Митровици.

Дисертација је организована у следећих 6 целина:

1. Увод
2. FSO комуникацијски системи
3. Пројектовање FSO система коришћењем математичких модела
4. Пренос слике са уграђеним дигиталним воденим жигом кроз *Chi-Square* – инверзна *Gamma* турбуленцијски канал
5. Хибридни RF/FSO пренос

6. Закључак

На крају докторске дисертације приложена је листа референци, списак скраћеница, списак слика и списак табела.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу је представљен увод у истраживање, где су дефинисани предмет и циљеви дисертације. Такође, дат је преглед претходних истраживања у области FSO комуникација са посебним освртом на изазове у моделовању атмосферских турбуленција. У овом делу је описана и примењена методологија истраживања, као и структура и организација целокупне дисертације.

Друго поглавље описује FSO преносни систем и његову структуру. Детаљно је разрађен процес слања, пропагације и детекције сигнала, при чему су анализирани различите модулациске шеме у процесу слања, као и методе детекције сигнала. Посебан акценат стављен је на атмосферске турбуленције које представљају један од најзначајнијих узрока слабљења сигнала. У том контексту урађена је и анализа различитих статистичких модела који се користе за описивање овог феномена уз приказ њихових карактеристика и услова примене.

У трећем поглављу је представљен нови турбуленцијски канал, заснован на теорији сцинтилације. За моделовање вртложних флукуација малих размера (small scale) коришћен је *Rician (Chi-square)* модел, док је за моделовање вртложних флукуација великих размера (large scale) примењена *инверзна Gamma* расподела. Комбинацијом ова два независна статистичка модела добијена је функција густине вероватноће (PDF) која описује нови турбуленцијски канал. У овом поглављу анализирана је средња вероватноћа грешке по биту (ABER – Average Bit Error Rate) за систем заснован на новопредложеном моделу турбуленцијског канала, где се као модулационе технике користе IM/DD – OOK (Intensity Modulation/Direct Detection – On-Off Keying) и SIM – DPSK (Subcarrier Intensity Modulation – Differential Phase Shift Keying). Кроз компаративну анализу, разматран је утицај различитих параметара система и нивоа турбуленција на стабилност и поузданост система. Добијени резултати су приказани у виду графичких зависности.

Четврто поглавље је посвећено верификацији перформанси предложеног турбуленцијског канала кроз анализу преноса дигиталне слике са уграђеним воденим жигом. На почетку је истакнут значај и примена дигиталних водених жигова у области безбедности и аутентификације података. Детаљно је описан процес уградње воденог жига у слику и његове екстракције након преноса кроз канал изложен утицају различитих атмосферских турбуленција. Разматрани су просторни и фреквенцијски домен уградње жига, при чему су анализиране различите трансформације, са посебним фокусом на *дискретну косинусну трансформацију* (DCT). Поређењем различитих техника, утврђено је да употреба фреквенцијског домена пружа боље резултате у смислу робусности жига. За процену квалитета пренесене слике коришћени су субјективни и објективни критеријуми, укључујући визуелну процену, вероватноћу грешке по биту, средњу квадратну грешку и максимални однос сигнал-шум.

Пето поглавље представља развој и анализу новог релејног хибридног RF/FSO система. За моделовање RF фединга коришћен је *Nakagami-m* модел, док је за моделовање FSO канала коришћен новопредложени *Chi-square – инверзна Gamma* модел. Разматрани су One-Hop и Multi-Hop начини преноса, а за анализу предложеног система примењена је CBPSK модулациона шема. У оквиру овог поглавља изведен је нови аналитички израз за средњу вероватноћу грешке по биту који омогућава боље разумевање перформанси хибридног система. У поређењу са класичним FSO системима, утврђено је да хибридни приступ пружа већу практичност, с обзиром на то да може умањити утицај атмосферских турбуленција. Додатно, применом хибридног Multi-Hop система омогућава се већа просторна покривеност, чиме се овај модел истиче као поузданије и флексибилније решење за реалне сценарије примене.

На крају дисертације изведен је закључак у којем су сумирани резултати добијени анализом параметара који одговарају функционисању система у различитим атмосферским условима. Дефинисани су услови у којима је вероватноћа грешке по биту минимална, што омогућава оптимизацију система за различите примене. Поред тога, предложене су методе и модели за даље унапређење оптичких бежичних комуникационих система, са посебним освртом на FSO и хибридне RF/FSO системе, уз могућност интеграције нових технологија и побољшања њихове робусности.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Предмет и циљ дисертације

Предмет истраживања докторске дисертације је утицај атмосферских турбуленција на карактеристике FSO система. У ту сврху креиран је нови математички модел за описивање статистичких карактеристика комуникационог канала FSO система. Овај математички модел је креиран као производ два независна статистичка модела. За моделовање вртложних флукуација малих размера коришћена је *Rician (Chi-Square)* расподела, док је се за моделовање вртложних флукуација великих размера коришћен модел са *инверзном-Gamma* расподелом. Као резултат производа ова два независна статистичка модела предложена је нова функција густине вероватноћа којом је моделиран горе поменути турбуленцијски канал. Овај модел је испитан за различите јачине атмосферских турбуленција и грешке позиционирања. У сврху анализе карактеристика турбуленцијског канала извршена је анализа средње грешке по биту, као мере квалитета сигнала. Компаративном анализом система који користи интензитетску модулацију са директном детекцијом и OOK шемом (Intensity Modulation/Direct Detection and On-Off Keying – IM/DD – OOK) и интензитетску модулацију подносиоцем (Subcarrier Intensity Modulation – SIM) са диференцијалном фазном шемом (Differential Phase Shift Keying – DPSK), у условима различитих јачина турбуленција и за различите вредности параметара система, изведени су закључци о стабилности и поузданости ових система.

У сврху валидације ново предложеног модела анализиран је пренос слике са уграђеним дигиталним воденим жигом кроз овај турбуленцијски канал, а добијени резултати су презентовани путем графикана.

Како би се надоместили недостаци FSO система настали под утицајем атмосферских турбуленција и грешке позиционирања, у дисертацији је предложен и разматран нови хибридни RF/FSO систем. За моделовање RF фединга коришћен је *Nakagami-m* фединг, док је се за моделовање FSO система коришћен ново предложени турбуленцијски канал са *Chi-square – инверзна Gamma* расподелом. Анализирана су два начина преноса хибридног RF/FSO система, One-Hop и Multi-Hop преносни систем. Компаративном анализом система заснованих на FSO и хибридном RF/FSO преносу предочени су услови у којим је

практичнија примена хибридних RF/FSO система преноса у односу на FSO системе, предложен је и модел са оптималним карактеристикама.

Циљ истраживања је идентификовање различитих утицаја атмосферских турбуленција на преносне карактеристике, како FSO, тако и хибридних RF/FSO система. Ово истраживање је омогућило развијање специфичних и прецизних алата за анализу и процену утицаја атмосферских турбуленција на бежичне системе преноса, са циљем олакшања поступка њиховог пројектовања.

3.2. Допринос истраживања

Према оцени чланова Комисије, најзначајнији научни доприноси докторске дисертације кандидата Ненада Станојевића огледају се у следећем:

- Развој и моделовање новог турбуленцијског канала заснованог на *Chi-square* – инверзној *Gamma* расподели, са одговарајућом функцијом густине вероватноће.
- Детаљна анализа перформанси FSO комуникационог система применом ново предложеног *Chi-square* – инверзна *Gamma* статистичког модела.
- Моделовање хибридног RF/FSO комуникационог система, где је RF канал описан *Nakagami-m* моделом, а FSO канал *Chi-square* – инверзна *Gamma* расподелом, са циљем прецизније процене перформанси у реалним условима.
- Извођење аналитичких и нумеричких резултата, њихово графичко представљање, као и развој одговарајућих математичких модела и симулација у циљу верификације добијених резултата.
- Компаративна анализа перформанси ново предложеног FSO система и на њему заснованог хибридног RF/FSO система, уз разматрање утицаја различитих нивоа атмосферских турбуленција и параметара система.
- Формирање закључака и предлагање најпоузданијих комуникационих система, са посебним фокусом на хибридне RF/FSO One-Hop и Multi-Hop моделе у зависности од услова преноса сигнала и карактеристика окружења.

3.3. Савременост и оригиналност

Циљ ове докторске дисертације био је развој новог статистичког модела за анализу карактеристика FSO комуникационих система под утицајем атмосферских турбуленција и грешака помераја. Кроз детаљну анализу перформанси система за различите вредности параметара, утврђене су њихове кључне особине на основу којих су идентификоване предности и ограничења оваквих система.

С обзиром на уочене недостатке FSO система, у дисертацији је предложен хибридни RF/FSO модел, који побољшава карактеристике постојећих система и доприноси њиховој поузданијој примени. Развојем новог статистичког модела извршена је анализа карактеристика хибридног система, а резултати су показали да овај приступ значајно унапређује укупне перформансе система. На основу извршених анализа, могу се јасно препоручити модели ових система који обезбеђују оптималне карактеристике у различитим условима рада.

За остварење циљева истраживања коришћене су различите методе које обухватају теоријске и практичне приступе анализи и моделовању FSO и хибридних RF/FSO система:

- Аналитичке и синтетичке методе – Обављена је детаљна анализа и преглед релевантне литературе из области предмета докторске дисертације, са посебним фокусом на радове објављене у врхунским научним часописима и оне са високим нивоом цитираности. Ове методе омогућиле су систематизацију постојећих сазнања и идентификацију отворених истраживачких питања.
- Методе предвиђања и калкулације – На основу утврђених математичких модела и аналитичких израза извршена је процена перформанси система у различитим условима. Ове методе су коришћене за симулацију и предвиђање понашања комуникационог канала под утицајем атмосферских турбуленција.
- Математичке методе и алати – У циљу добијања аналитичких резултата, примењени су напредни математички приступи, укључујући статистичко моделовање, извођење израза за густину вероватноће (PDF), анализу средње вероватноће грешке по биту (ABER), као и различите трансформационе методе за анализу сигнала.

- Методе генерализације, апстракције и специјализације – Ове методе су коришћене за извођење општих закључака из специфичних анализа, као и за прилагођавање општих математичких модела конкретним случајевима комуникационих система.

- Програмска подршка и симулационе технике – За верификацију добијених аналитичких израза и њихову практичну примену коришћени су одговарајући софтверски алати за статистичку анализу и симулацију комуникационих система.

3.4. Оцена достигнутих способности кандидата за самосталан научни рад

Кандидат Ненад Станојевић је способан за самостални научно истраживачки рад и за активно учешће у тимском раду. Сама докторска дисертација са детаљном анализом добијених резултата, научни радови везани за ову тематику и рад у тиму, указују на квалитет рада, организованост, систематичност и велику мотивисаност самог кандидата да се бави научно-истраживачким радом. Добијени резултати и изведена закључна разматрања указују на способност кандидата Ненада Станојевића за будући успешан и самостални научни рад.

4. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Ненада Станојевића, под насловом: **„Прилог статистичким моделима за анализу перформанси FSO система: нови Chi-square – инверзна Gamma модел и његова примена на хибридни RF/FSO систем са Nakagami-m RF федингом“**, представља савремен, оригиналан и евидентан научни допринос. Дисертација је у сагласности са образложењем у пријави теме и садржи све елементе које предвиђа Правилник о докторским студијама Факултета техничких наука Универзитета у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици. Комисија потврђује да докторска дисертација има оригиналан и савремен научни допринос у области Електротехничког и рачунарског инжењерства. На основу прегледане докторске дисертације, као и увида у верификован научни допринос кроз објављене радове у

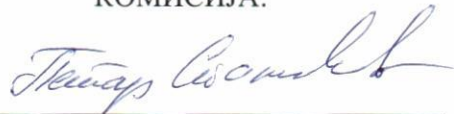
међународним научним часописима, Комисија за оцену и одбрану урађене докторске дисертације, закључује да кандидат Ненад Станојевић испуњава све законске и остале услове за одбрану докторске дисертације. Стога Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Косовској Митровици да прихвати позитиван извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Ненада Станојевића, под називом:

„Прилог статистичким моделима за анализу перформанси FSO система: нови Chi-square – инверзна Gamma модел и његова примена на хибридни RF/FSO систем са Nakagami-m RF федингом“

и да исту упути у даљу процедуру.

У Косовској Митровици,

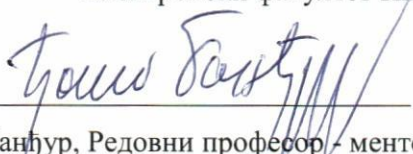
КОМИСИЈА:



проф. др Петар Спалевић, редовни професор - председник
Факултет техничких наука у Косовској Митровици



проф. др Дејан Милић, редовни професор - члан
Електронски факултет Ниш



проф. др Ђоко Банђур, Редовни професор - ментор
Факултет техничких наука у Косовској Митровици