

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд за придобиване на научната степен „доктор“

Професионално направление: 4.1 Физически науки

Докторска програма: „Физика на вълновите процеси“

Автор на дисертационния труд: Мариам Викар, ИОМТ-БАН

Научни ръководители:

доц. д-р Виолета Маджарова (ИОМТ-БАН, България)

проф. дфн. Елена Стойкова (ИОМТ-БАН, България)

д-р Ердем Шахин (Университет на Тампере, Финландия)

проф. д-р Атанас Гочев (Университет на Тампере, Финландия)

Тема на дисертационния труд: „Дълбокообучаващи модели за реконструиране и анализ на съдови изображения, получени чрез оптична кохерентна томография с променлива дължина на вълната (SS-OCT)“

изготвил рецензията: Вера Маринова Господинова, професор, дфн., ИОМТ- БАН
научно жури, определено със заповед на Директора на ИОМТ-БАН № РД-15-749 от 08.10.2025г.

1. Кратки биографични данни за докторанта

Мариам Викар е родена през 1992г в Алигар, Индия. През 2015 завършва Бакалавърска степен по Технологии в Алигарх Мюсюлмански университет, Индия, а през 2020г Магистратура Information and Communication Technology в същия университет. През 2021 спечелва конкурс за редовна докторантура към проект PLENOPTIMA, финансиран от програмата „Мария Склодовска-Кюри“ на Европейския съюз, част от Рамкова програма за наука и иновации „Хоризонт 2020“, дейност Мрежи за първоначално и иновативно обучение - Innovative training networks (ITN). Докторантурата е съвместна с Университета на Тампере, Финландия.

По време на докторантурата си Мариам Викар е положила всички необходими изпити по специалността, успешно е преминала 2 специализирани курса на обучение, курс по езикови познания и по компютърни умения.

2. Данни за дисертационния труд

Дисертационният труд е посветен на оптичната кохерентна томография, като съвременен, неинвазивен метод за образна диагностика (биомедицинско визуализиране). Дисертацията е методично структурирана върху поставени от авторката 5 изследователски въпроса, обединени в две основни предизвикателства:

1) разработване на ефективни модели за дълбоко обучение (DL) с намален брой параметри, които могат едновременно да осигурят сегментационни карти с високо качество и измервания на дебелината на стените на вените с висока точност при анализ на оптична кохерентна томография (SS-OCT) изображения.

2) разработване на модели за дълбоко обучение, които реконструират изображения от SS-OCT данни с подобрена изчислителната ефективност и качеството на изображението.

Дисертационният труд се състои от 130 страници и включва 5 глави, съдържащи: Увод, Обзорна част, 2 Експериментални глави, Заключение, Основни приноси, Списък на публикациите по дисертацията и Списък на представянията на международни конференции, Списък на литературните източници.

Уводната част е въведение в темата на дисертацията и съдържа кратък преглед на приложението на DL за подобряване на възможностите на оптичната кохерентна томография (OCT). Следва дефиниране на ключовите предизвикателства и поставяне на откритите за разрешаване проблеми. Последният раздел към уводната част описва общата структура на дисертацията.

Глава 2 е Литературен обзор, в които са представени ключовите предизвикателства и проблемите, които мотивират изследователските въпроси. Подчертано е значението на OCT изображенията и ролята на DL, като сегментиране и реконструкция на изображенията. Обзорната глава започва с представяне на OCT системите и извличането на информация за дълбочината, необходима за генериране на изображения. Авторката разглежда предизвикателството да използва SS-OCT за съдови изследвания, което изисква високо прецизна сегментация. Глава 2 предоставя основните принципи на OCT и сравнителен анализ на различни OCT системи по отношение на съотношение сигнал/шум (SNR) и системите Swept-Source, използвани за събиране на данни. Подробно са обяснени OCT процесите за обработка на изображения. Разгледани са най-съвременните DL методи, използвани за сегментиране и реконструкция. Накрая са проследени последните постижения в анализ на медицински изображения, които интегрират OCT данни с DL модели, базирайки се на техния потенциал в клиничните приложения. Обобщени са настоящите пропуски в OCT образната диагностика и е направен преглед на най-съвременните методи за дълбоко обучение.

Глава 3 е посветена на решения за сегментиране на разширени вени, при които се използва модел на сегментиране, базиран на архитектура тип енкодер-декодер, с фокус върху намаляване сложността на модела (Публикация I). Тук умело са предложени методи за оценка на формата и дебелината на разширени вени, използвайки DL (Публикация II).

Глава 4 разглежда DL подходите за реконструиране на изображения от OCT данни, с фокус върху SS-OCT системи, където суровите данни по своята същност са нелинейни в областта на вълновите числа. Представени са методи за генериране на висококачествени OCT изображения директно от нискокачествени реконструирани изображения (Публикация III). Предложен е иновативен модел за реконструиране с ниска времева сложност, базиран на архитектура енкодер-декодер (Публикация IV).

Глава 5 обобщава основните приноси и заключения. Също така са очертани потенциални насоки за бъдещи изследвания в рамките на темата, както и възможности за по-нататъшни приложения.

Дисертацията е написана на основата на 4 публикации и 8 представяния на международни конференции, като в края са приложени и отпечатъците на всички статии по нея. Съдържа 33 фигури, 12 таблици и 150 цитирани източника.

От справката за изпълнение на минималните изисквания в Приложение 1, Таблица 1, съгласно показател Г докторантката е отчела 65 точки при минимални 30, като две от публикациите са в списания с импакт фактор и квантили Q1 и Q2, а останалите 2 публикации са в SJR. Така, от група А и група Г докторантката представя общо 115 точки от минимално изисквани 80 точки. В допълнение, Мирам Викар има 22 точки от 11 забелязани независими цитата (отнасящи се към група Д, която съгласно изискванията не е задължителна за подпълване). Забелязаните цитати са отличен показател за актуалността и значимостта на извършените в дисертацията изследвания.

2.1. Актуалност на разработвания в дисертационния труд проблем

Целта на дисертационния труд е да се изследва приложението на дълбокото обучение (DL) за подобряване анализа и реконструирането на SS-OCT изображения.

Несъмнено темата е изключително актуална и интересна, поради съчетанието на 2 важни аспекта- от една страна оптичната кохерентна томография (OCT) е утвърден метод в медицинското изобразяване. От друга страна, редица предизвикателства налагат необходимостта от разработване на иновативни подобрения по отношение на автоматизацията-например при клиничното изобразяване в реално време, надеждността на оптимизацията и балансиране на точността с изчислителната сложност е изключително важна.

За постигане на целта, докторантката си е поставила да отговори на 5 изследователски въпроса свързани с: (1) оценка на точността на сегментация на венозни слоеве при минимална сложност на модела (Сегментация с ниска сложност); (2) разработване на интегриран модел за надеждна сегментация с точни измервания на дебелината; (3) реконструиране на изображения директно от сурови SS-OCT данни с намалени изчислителни и хардуерни изисквания, като същевременно се поддържа качество на изображението, сравнимо със стандартния SS-OCT; (4) оптимизация на данните в пространствената и Фурие области за подобро качество и намален шум (Реконструиране в пространствена и Фурие домейн области); (5) създаване на DL модел с ниска сложност за реконструиране в реално време.

2.2. Познаване състоянието на проблема и анализ на литературните данни

Литературния обзор (Глава 2) е много добре представен и систематизиран, описани са ключовите предизвикателства и проблемите, които мотивират изследователските въпроси. Подчертано е значението на OCT изображенията и ролята на DL, като сегментиране и реконструкция на изображения. Обзорната глава започва с представяне на OCT системите, извличане на информация в дълбочина, необходима за генериране на изображения. Авторката подробно разглежда предизвикателството да използва SS-OCT за съдови изследвания, което изисква високо прецизна сегментация и физическо измерване на меки тъкани.

Глава 2 предоставя общ преглед на основните принципи на OCT и сравнителен анализ на различните OCT системи по отношение на съотношение сигнал/шум (SNR), използвани за събиране на данни. Подробно са обяснени OCT процесите за обработка на изображения. Разгледани са най-съвременните DL методи, използвани за сегментиране и реконструкция, базирани на изображения. Накрая са проследени последните постижения в анализа на медицински изображения, които интегрират OCT данни с DL модели, базирайки се на техния потенциал в клиничните приложения. Обобщени са и настоящите пропуски в OCT образната диагностика.

Литературният обзор е написан въз основата на 150 източника, повечето от които от последните години. Това показва отличната осведоменост на кандидатката и познаването на проблемите по темата на дисертацията в дълбочина. Несъмнено докторантката отлично познава състоянието на проблема.

2.3. Методи за изследване в отговор на поставените цели и задачи

За постигане на целите, докторантката е използвала теоретични и експериментални подходи за анализ и реконструиране на OCT изображения на венозни структури, също и в разработването и оптимизирането на DL модели - всички те отлично съчетани и обмислени. Първоначално, авторката подробно е описала разработването на нови DL модели за сегментиране и оценка на дебелината на вени. Впоследствие тематиката е насочена към по-фундаментално предизвикателство: високото изчислително натоварване и хардуерната зависимост на стандартния SS-OCT модел за реконструиране.

Тук следва да се отбележи и оригиналният подход, с който Мариам Викар идентифицира стъпката на k-линеаризация като основна пречка и предлага нова, базирана на DL рамка, за да заобиколи изцяло този процес, позволявайки високоскоростно и висококачествено реконструиране на изображения директно от сурови, нелинейни по дължината на вълната.

Разработените в дисертацията методи показват висока ефективност и значимост за развитието на съвременната OCT диагностика.

2.4. Анализ на получените резултати

Резултатите в дисертацията са представени в Глави 3 и 4.

Глава 3 разглежда практическото приложение на DL- базирани методи за анализ на SS-OCT изображения на венозни структури, като директно отговаря на изследователски въпроси 1 и 2. Според авторката, един от основните проблеми при OCT системите е свързан с качеството на изображението, поради спекъл шум или скъпи хардуерни или софтуерно-базирани техники за обработка. За да се преодолее предизвикателството на сложността на модела поради голям брой параметри, тя разработва Opto-UNet, базиран на архитектурата U-Net (Публикация I). Моделът предлага високо оптимизирана структура за точна сегментация на венозни изображения, като надминава други модели по възможностите си.

Освен това, в Глава 3, е представен и интегриран модел TREE, способен за прогнозиране на дебелината на вените, като е използвано трансферно обучение (Публикация II). Модел TREE е разработен върху едновременно определяне на карти за сегментация и стойности на дебелината от SS-OCT изображения.

Глава 4 разглежда DL подходите за реконструиране на изображения от OCT данни, с фокус върху SS-OCT системи, където суровите данни по своята същност са нелинейни в областта на вълновите числа. Представени са методи за генериране на висококачествени OCT изображения директно от нискокачествени сканирания, както е показано в Публикация III. Освен това, авторката въвежда модел за реконструиране с ниска времева сложност, базиран на архитектура на енкодер-декодер, която е подробно изследвана в Публикация IV. Тази глава отговаря на изследователски въпроси 3-5.

Представените експериментални резултати и изводи в Глави 3 и 4 показват, че поставените цели и задачи на дисертационния труд са напълно постигнати.

2.5. Научни и научно-приложни приноси в дисертационния труд

Научните изследвания, представени в дисертационния труд, са в областта на физиката на вълновите процеси. Съгласна съм с така формулираните приноси на дисертационния труд, които накратко могат да бъдат обобщени в две основни направления:

Част 1: Дълбоко обучение за анализ на съдови изображения (приносите са представени в Глава 3)

Принос 1: Авторката разработва т.нар оптимизирана сегментация „Opto-UNet“, базиран на U-Net модел. Успешно е демонстрирано, че моделът постига висока точност на сегментация на венозните слоеве, което го прави изключително ефикасен и практичен за клинични приложения. Този принос директно отговаря на въпрос 1 (RQ1).

Принос 2: В допълнение, дисертантката представя и интегриран модел „TREE“, който едновременно извършва сегментация и оценка на дебелината. Това е сложен подход с две задачи, който използва трансферно обучение. Разработването на модула SPD е съществен принос, който подобрява способността на мрежата да интегрира информация за по-точни прогнози. Този принос отговаря на въпрос 2 (RQ2).

Част 2: Дълбоко машинно обучение за реконструиране на OCT изображения (приносите са представени в Глава 4)

Това е най-значимият принос на дисертацията, като се занимава с фундаменталната обработка на SS-OCT данни и разглежда изследователски въпроси 3, 4 и 5.

Принос 3: Разработен е иновативен модел "WAVE-UNET", обучен да реконструира висококачествени OCT изображения директно от сурови данни в домейна на дължината на вълната, които са нелинейни в k-пространството. Така чрез заобикаляне на скъпата (от изчислителна гледна точка) и хардуерно интензивна k-линеаризация, с тази разработка дисертантката има съществен принос в парадигмата в SS-OCT обработката на изображения. Този принос отговаря на въпрос 3. (RQ3).

Принос 4: Разработена е иновативна система с два домейна, използвайки мрежа от пространствен домейн (SD-CNN) и Фурие домейн (FD-CNN). Този подход оптимизира данните и в двата домейна, като същевременно постига отлично потискане на спекъл шума и се оказва изключително ефективен за

възстановяване на морфологични структури. Този принос отговаря на въпрос 4. (RQ4).

Принос 5: Кулминацията на приносите в дисертацията е разработената валидирана рамка за DL с ниска сложност и висока скорост, която служи като алтернатива на стандартния модел за реконструкция. Авторката е предоставила доказателства за намалено време за обработка (Таблица 4.5), демонстрирайки приложението на този подход за изображения в реално време, което е критично при клиничните и изследователските системи. Този принос отговаря на въпрос 5. (RQ5)

Разработените в настоящата дисертацията методи показват висока ефективност, като представените резултати са оригинални и достоверни.

3. Преценка на личния принос на докторанта

Познавам Мариам Викар от самото начало, когато се присъедини към ИОМТ като редовна докторантка по проект PLENOPTIMA, финансиран от програмата „Мария Склодовска-Кюри“ на Европейския съюз. Още тогава тя впечатляваше с нейната професионална подготовка, интелект и отговорност.

От личните ми впечатления от докторантката и представените от нея доклади на семинарите на ИОМТ, както и от няколко международни срещи и конференции, на които сме присъствали заедно смятам, че извършените дейности по дисертацията са нейно лично дело. Още повече, в началото на дисертацията, след посочените авторски статии, подробно е описан приноса на всеки от съавторите в статиите.

Тук искам да отбележа, че Мариам Викар е изключително активна в различни научни събития. Отлично впечатление прави, че авторката работи в добро сътрудничество с лекари от Университетска болница „София Мед“, което прави работата интердисциплинарна.

Освен 4-те статии към дисертацията, Мариам е съавтор на още 7 статии, отпечатани в списания за периода, когато тя е редовен докторант в ИОМТ.

4. Публикации по дисертационния труд

Дисертационният труд е написан на основата на 4 публикации в списания, от които 2 са с импакт фактор и 2 с импакт ранг. Тук трябва да се отбележи, че Мариам Викар е пръв автор във всичките четири публикации.

По темата на дисертацията са забелязани 11 цитата. Резултатите по дисертацията са представени и под формата на доклади или постерни съобщения на 8 конференции и научни форуми.

Публикационна активност на докторантката, както и броят на забелязаните цитати са отличен показател за актуалността на научния проблем и значимостта на постигнатите резултати.

5. Оценка на автореферата

Авторефератът е много добре оформен и отговаря на изискванията за обем и съдържание. Отразени са основните дейности, получените резултати и приносите в дисертацията.

6. Критични бележки и въпроси

Нямам критични бележки към дисертационния труд.

Имам следните въпроси и коментари:

- Кои характеристики на венозните слоеве са най-трудни за сегментиране и как модела на сегментацията реагира на несигурни пиксели, когато венозните граници са силно размити?
- По какви критерии са избрани специфичните области (оранжев фон и жълт фон), използвани на Фигура 4.8 за изчисляване на резултатите от CNR, представени в Таблица 4.2?
- Коя е най-предизвикателната насока в усъвършенстването на дълбокообучаващите методи за следващо поколение swept-source OCT (SS-OCT)?

7. Мотивирано и ясно формулирано заключение

Приносите в дисертацията са съществени и имат научно-приложен характер. Обработени са много голямо количество данни и направени съответните експерименти. Постигнати са важни резултати, публикувани в списания с импакт фактор (квантили Q1 и Q2) и импакт ранг. Във всички статии по дисертацията Мариам Викар е първи автор. Част от резултатите по дисертацията са представени на международни научни форуми. До момента има забелязани 11 цитата, което доказва актуалността на разработваната тема. Несъмнено приносът на докторантката е значителен, като това подробно е описано на стр. Хvi в дисертационния труд.

Викар е направила значителен принос в областта на биомедицинското инженерство в съчетание с дълбокообучаващите методи. Дисертацията не само предоставя нови подходи за съдов анализ, но и има значителен принос към самата основа на реконструирането на изображения от SS-OCT данни. Изследването успешно отговаря на всички поставени въпроси, демонстрирайки задълбочено овладяване както на основните принципи, така и на усъвършенстваните техники за дълбоко обучение. Тази работа несъмнено ще представлява голям интерес както за клиничните изследователи, така и за производителите на OCT системи. Представеният дисертационен труд е оригинален и с висока научна стойност.

Представеният ми за рецензия дисертационен труд и наукометричните данни на Мариам Викар отговарят и дори надвишават националните изисквания за присъждане на ОНС „доктор“ в Закона за развитие на научния състав в Република България, както и изискванията за защита на дисертационен труд в Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и за заемане на академични длъжности в ИОМТ-БАН.

В заключение, заявявам своето съгласие и препоръчвам на уважаваното Научно Жури да присъди образователната и научна степен „доктор“ в професионално направление 4.1 Физически науки, специалност „Физика на вълновите процеси“.

02.12.2025 г.

изготвил рецензията:

/проф. дфн Вера Маринова /