

Vrednotenje vpliva števila linearno razporejenih optičnih vlaken na kakovost napovedi optičnih lastnosti sipajočih vzorcev iz zajete reflektance

Miran Búrmen

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: miran.buermen@fe.uni-lj.si

Povzetek. Povratno sipana svetloba, ki jo zajamemo z večvlakenskimi optičnimi sondami v obliki prostorsko razločene reflektance, nosi informacijo o optičnih lastnostih opazovanega vzorca. Slednje lahko določimo z uporabo inverzni modelov širjenja svetlobe, ki preslikajo zajeto reflektanco v eno ali več izbranih optičnih lastnosti vzorca. V zadnjem obdobju se med inverznimi modeli uveljavljajo predvsem regresijski, ki temeljijo na nevronskih mrežah. Glavna prednost tovrstnih inverznih modelov leži v njihovi računski učinkovitosti, ki omogoča določanje optičnih lastnosti v realnem času, tudi na napravah z omejeno računsko zmogljivostjo. Kakovost napovedi inverznih modelov je pri tem v veliki meri odvisna od informacije, ki jo nosi zajeta prostorsko razločena reflektanca. V tem delu podrobno ovrednotimo kakovost napovedi optičnih lastnosti sipajočega vzorca, ki jih dobimo z regresijskimi modeli iz prostorsko razločene reflektance, zajete z optičnimi sondami z linearno razporeditvijo različnega števila optičnih vlaken.

Ključne besede: sipanje, absorpcija, sipalna fazna funkcija, inverzni modeli, optične sonde, določanje optičnih lastnosti

The effect of the number of optical fibers on the quality of optical properties of scattering media estimated from the acquired reflectance

The backscattered light captured by a multi-fiber optical probe in a form of spatially-resolved reflectance holds a significant information on the optical properties of an observed sample. The optical properties can be estimated by adopting an appropriate inverse light propagation model that maps the captured reflectance to one or more optical properties of the sample. Among the inverse models, regression models based on neural networks are increasingly gaining popularity in a number of different fields and related applications. The main advantage of such inverse models is their inherent computational efficiency, which allows for determination of optical properties in real time, even on performance-limited embedded systems. The quality of predictions attained with the inverse models largely depends on the information held by the captured spatially-resolved reflectance. In this study, we assess the quality of predictions made by neural network-based inverse models from spatially-resolved reflectance captured by optical fiber probes with a different number of linearly-arranged optical fibers.

Keywords: scattering, absorption, scattering phase function, inverse models, optical probes, determination of optical properties

1 UVOD

Povratno sipano svetlobo oziroma reflektanco sipajočih vzorcev lahko učinkovito izmerimo z optičnimi sondami. V ta namen pogosto uporabimo merilno postavitev, kjer

eno optično vlakno služi kot svetlobni vir, s preostalimi optičnimi vlakni pa zajamemo povratno sipano svetlobo na različnih razdaljah od svetlobnega vira. Tovrstnim meritvam pravimo, da so prostorsko razločene, izmerjeni povratno sipani svetlobi pa rečemo prostorsko razločena reflektanca (PRR). Potek izmerjene PRR je za dano geometrijo optične sonde odvisen od optičnih lastnosti merjenca in ga posledično lahko izkoristimo za določanje njegovih optičnih lastnosti. Če so razdalje med svetlobnim virom in titalom večje od povprečne transportne poti in sipanje vzorca prevladuje nad absorpcijo, meritve potekajo v difuzijskem režimu. V tem režimu lahko PRR zadovoljivo opišemo z absorpcijskim koeficientom μ_a ter reduciranim sipalnim koeficientom μ'_s . Reducirani sipalni koeficient povezuje sipalni koeficient μ_s in prvi Legendrov moment oz. anizotropijo sipalne fazne funkcije g_1 po enačbi $\mu'_s = (1 - g_1)\mu_s$. Če so razdalje med svetlobnim virom in titalom manjše od povprečne transportne poti, pa PRR postane močnejše odvisna od poteka sipalne fazne funkcije, kar zahteva dodatne parametre za njen opis. Za tovrstne meritve pravimo, da potekajo v subdifuzijskem režimu [1–9]. Uveljavljeni parametri za opis subdifuzijske PRR večinoma temeljijo na Legendrovih momentih višjega reda. Med njimi se najpogosteje uporabljata podobnostna parametra $\gamma = (1 - g_2)/(1 - g_1)$ in $\delta = (1 - g_3)/(1 - g_1)$ [1, 2, 8].

Povratno sipana svetloba, ki jo zajamemo v obliki PRR, je tesno povezana z optičnimi lastnostmi opazovanega vzorca. Povezavo med optičnimi lastnostmi vzorca in izmerjeno PRR lahko za nepolarizirano sve-

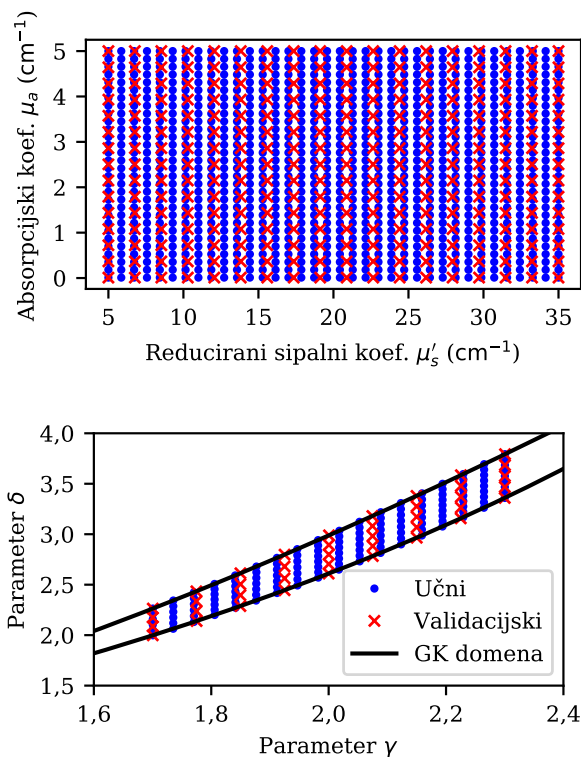
tlobo zadovoljivo opišemo z modelom širjenja svetlobe, ki temelji na enačbi sevalnega prenosa energije (angl. 'radiative transport equation' - RTE). Ker analitične rešitve RTE obstajajo zgolj za enostavne geometrije optične sonde in vzorca [10–13], ne pa tudi za poljubno merilno postavitev [14], ali za poljubno strukturo sipajočega vzorca [15], RTE rešujemo numerično. V ta namen uporabimo simulacije Monte Carlo (MC), ki se v literaturi uporabljajo kot referenčna numerična rešitev RTE [16, 17]

Če želimo iz zajete PRR določiti optične lastnosti vzorca, potrebujemo inverzni model. V ta namen so se do nedavnega uporabljale predvsem iskalne tabele (angl. *lookup table* LUT) [6–8, 18–22], v zadnjem obdobju pa jih pospešeno izpodrivajo regresijski modeli, ki temeljijo na nevronskih mrežah [23–25]. Slednji učinkovito odpravijo dve glavni pomanjkljivosti inverznih modelov, ki temeljijo na iskalnih tabelah, in sicer eksponentno odvisnost velikosti iskalne tabele od števila prostih parametrov modela ter diskretno zalogo vrednosti. Poleg tega, regresijski modeli omogočajo računsko učinkovito izvedbo inverznih modelov v realnem času in enostavno razširljivost modela z novimi optičnimi parametri.

V tej študiji smo sistematično ovrednotili vpliv števila strnjenih in linearno razporejenih optičnih vlaken v optični sondi na kakovost napovedi optičnih lastnosti razsežnih in homogenih sipajočih medijev iz meritev PRR. Za določitev optičnih lastnosti smo uporabili regresijske inverzne modele, ki temeljijo na nevroskih mrežah. V študiji smo se omejili na tri optične lastnosti medija, in sicer absorpcijski in reducirani sipalni koeficient ter parameter γ sipalne fazne funkcije.

2 MATERIALI IN METODOLOGIJA

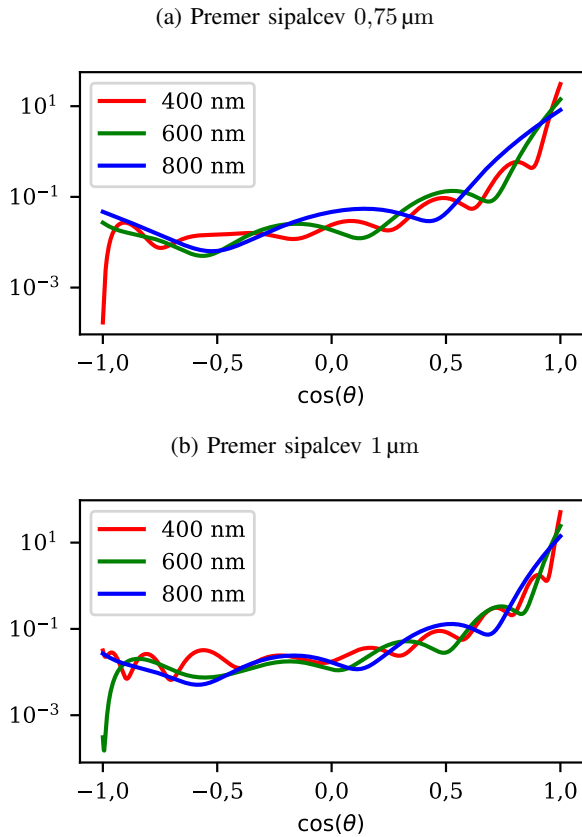
Za namene priprave in vrednotenja inverznih modelov smo s pomočjo simulacij MC pripravili učni in validacijski niz PRR. Pri tem je parametrični prostor optičnih lastnosti vključeval absorpcijski koeficient μ_a , reducirani sipalni koeficient μ'_s ter parametra sipalne fazne funkcije γ in δ . Optične lastnosti učnega niza v ravnini absorpcijskega μ_a in reduciranega sipalnega μ'_s koeficienta smo vzorčili s pravokotno mrežo enakomerno razporejenih točk. Absorpcijski koeficient smo vzorčili v 30 točkah na intervalu od 0 do 5 cm^{-1} , reducirani sipalni koeficient pa v 36 točkah na intervalu od 5 do 35 cm^{-1} . Variabilnosti sipalne fazne funkcije sipajočega medija, ki podaja verjetnostno porazdelitev kota sipanja θ , smo opisali z dvoparametričnim modelom Gegenbauer-Kernel (GK). Pri tem smo parameter γ vzorčili z 18 enakomerno razporejenimi točkami od 1,7 do 2,3, interval vrednosti parametra δ pa je bil vsakokrat omejen s pripadajočo domeno sipalne fazne funkcije. Pri vsaki vrednosti parametra γ smo skupno število enakomerno razporejenih točk vzdolž δ koordinatne osi določili tako, da je bila razdalja med sosednjima točkama vzdolž δ koordinatne osi manjša



Slika 1: Vzorčne točke učnega in validacijskega niza PRR v ravnini absorpcijskega μ_a in reduciranega sipalnega koeficienta μ'_s (zgoraj) ter v ravnini parametrov sipalne fazne funkcije γ in δ (spodaj). Črna polna črta označuje rob veljavne domene sipalne fazne funkcije GK.

od 0,06. Skupno število vzorčnih točk učnega niza v γ - δ ravnini je tako znašalo 136, skupno število vseh točk učnega niza pa 147.960. Na podoben način smo določili še optične lastnosti vzorčnih točk validacijskega niza. Pri tem smo ohranili intervale optičnih lastnosti učnega niza, zmanjšali pa smo število enakomerno razporejenih točk. Za absorpcijski koeficient smo uporabili 15 točk, za reducirani sipalni koeficient 18 točk, za parameter γ 9 točk, pri parametru δ pa smo se zadovoljili z razdaljo med sosednjima točkama, ki ni presegala 0,12. Število vzorčnih točk validacijskega niza v γ - δ ravnini je tako znašalo 41, skupno število vseh vzorčnih točk validacijskega niza pa 11.070. Razporeditev vzorčnih točk učnega in validacijskega niza prikazuje slika 1.

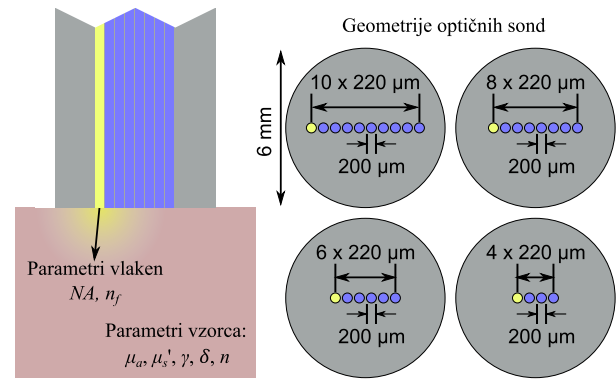
Za povsem neodvisno vrednotenje inverznih modelov smo pripravili še validacijska niza PRR, ki temeljita na sipalni fazni funkciji vodne suspenzije polistirenskih mikrosferičnih delcev (slika 2). Tovrstne sipalne fazne funkcije so analitično določljive v okviru Miejeve teorije in se pomembno razlikujejo od sipalne fazne funkcije GK. Vzorčne točke v ravnini absorpcijskega in reduciranega sipalnega koeficienta smo izbrali tako, da ležijo na enakomerno razporejeni mreži točk, in sicer 10 točk za absorpcijski koeficient in 10 točk za reducirani



Slika 2: Sipalne fazne funkcije vodne suspenzije polistirenskih mikrosferičnih delcev premera $0,75\ \mu\text{m}$ in $1\ \mu\text{m}$ za svetlobo valovne dolžine $400\ \text{nm}$, $600\ \text{nm}$ in $800\ \text{nm}$.

sipalni koeficient. Razpon vrednosti absorpcijskega in reduciranega sipalnega koeficienta smo obdržali enak kot pri učnem in validacijskem nizu, ki temeljita na sipalni fazni funkciji GK. Dodatno variabilnost sipalne fazne funkcije smo dosegli s spreminjanjem valovne dolžine svetlobe od $400\ \text{nm}$ do $800\ \text{nm}$ s korakom $20\ \text{nm}$. Skupno število vzorcev Miejevega niza PRR za izbrani premer mikrosferičnih delcev je tako znašalo 2.100 . Za namene študije smo pripravili Miejeva niza PRR za polistirenske mikrosferične delce premera $0,75\ \mu\text{m}$ in $1,0\ \mu\text{m}$.

V simulacijah MC smo privzeli polneskončno geometrijo sipajočega vzorca z lomnim količnikom $n = 1,333$ pri $600\ \text{nm}$. Geometrija optičnih sond, ki smo jih uporabili v tej študiji, je vključevala 4, 6, 8 ali 10 strnjjenih linearno razporejenih večrodnih optičnih vlaken. Prvo optično vlakno smo vsakokrat uporabili kot svetlobni vir, preostala optična vlakna pa kot tipala za zajem PRR. Premer optičnih vlaken in razdalja med središči sosednjih optičnih vlaken sta znašala $220\ \mu\text{m}$, premer sredice optičnega vlakna $200\ \mu\text{m}$, lomni količnik sredice optičnega vlakna (n_f) pri $600\ \text{nm}$ $1,458$, pripadajoča numerična odprtina (NA) sredice optičnega vlakna pa $0,22$. Ilustracijo merilne postavitve in geometrijo optičnih



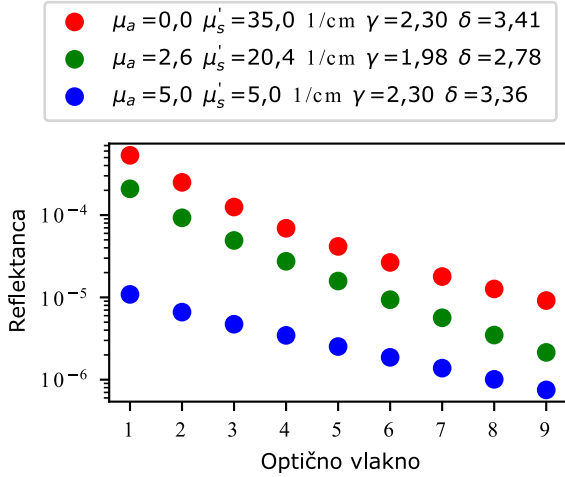
Slika 3: Ilustracija merilne postavitve in geometrija optičnih sond, ki smo jo uporabili v tej študiji.

sond prikazuje slika 3.

Za določanje posameznih optičnih lastnosti iz PRR smo uporabili ločene regresijske inverzne modele, ki temeljijo na globokih nevronskih mrežah [23]. Izbrana topologija nevronske mreže je temeljila na petplastnem perceptronu. V prvi plasti je bilo 35 nevronov, v drugi plasti 25 nevronov, v tretji plasti 15 nevronov, v četrti plasti 5 nevronov in v zadnji plasti 1 nevron. V prvi plasti smo uporabili linearno aktivacijsko funkcijo, v vmesnih plasteh hiperbolični tangens in v izhodni plasti sigmoidno aktivacijsko funkcijo. Vhode nevronske mreže so predstavljale komponente PRR, ki smo jih predhodno logaritmirali in nato še normalizirali s preslikavo SNV (angl. Standard Normal Variate). Parametre preslikave SNV smo določili na učnem nizu in jih nato uporabili na vseh preostalih podatkovnih nizih. Izhod nevronske mreže je predstavljal izbrano optično lastnost sipajočega vzorca, normalizirano na interval od 0 do 1. Za učenje nevronske mreže smo uporabili učno množico PRR. Ker gre pri učenju nevronske mreže za stohastični proces, smo postopek učenja ponovili 20-krat in nato izbrali inverzni model, z najmanjšim korenem povprečne kvadratne napake (angl. root mean square error) napovedi izbrane optične lastnosti. Tako smo za vsako konfiguracijo optične sonde pripravili tri inverzne regresijske modele, po enega za vsako izmed treh iskanih optičnih lastnosti (μ_a , μ_s' in γ).

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

Slika 4 prikazuje nekaj primerov PRR za povprečne in skrajne vrednosti optičnih lastnosti vzorca, ki jih izmerimo z optično sondo. Največjo PRR izmerimo pri vzorcu z nizkim absorpcijskim koeficientom in visokim reduciranim sipalnim koeficientom. Obratno, najmanjšo vrednost PRR izmerimo pri vzorcu z visokim absorpcijskim koeficientom in nizkim reduciranim sipalnim koeficientom. Za praktično izvedbo meritev je zelo pomembno razmerje med reflektancama, ki ju izmerimo s prvim in zadnjim optičnim vlaknom. Razmerje reflektanc je odvisno od optičnih lastnosti vzorca in ga



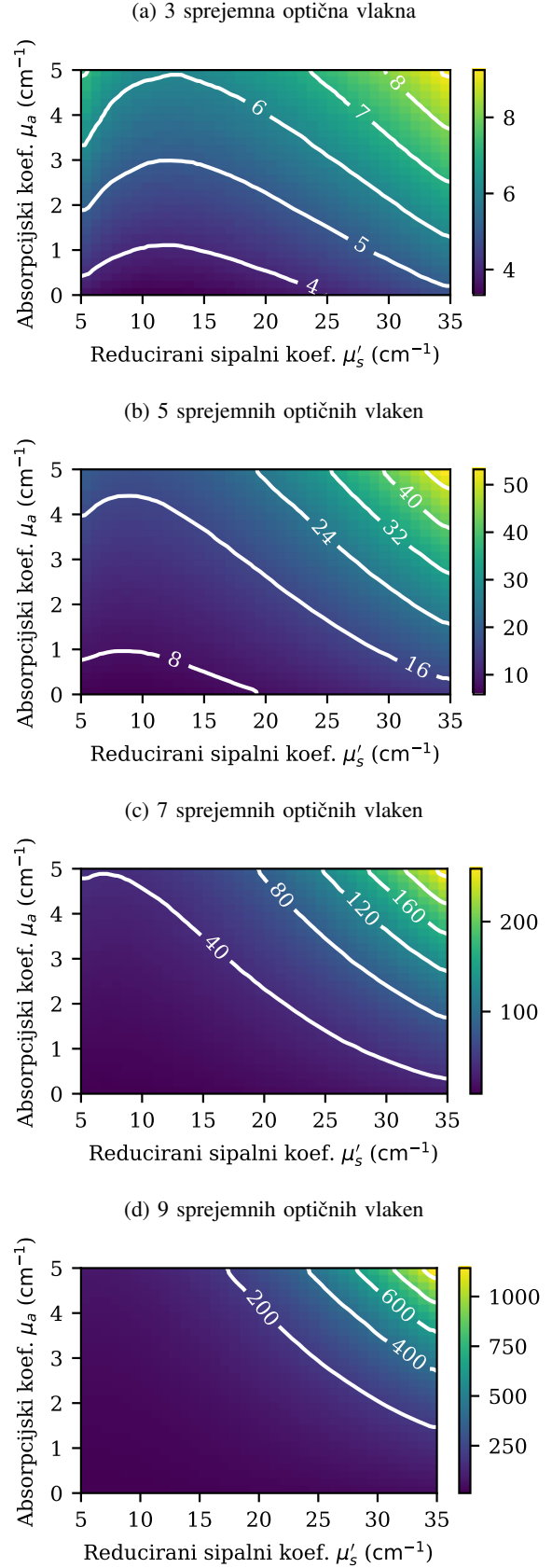
Slika 4: Trije primeri PRR, ki pripadajo povprečnim in skrajnim vrednostim optičnih lastnosti učnega in validacijskega niza.

prikazuje slika 5. V primeru, ko uporabimo isti čas osvetlitve tipal za vsa optična vlakna, bo razmerje med koristnim signalom in šumom na zadnjem optičnem vlaknu za približno koren razmerja reflektanc manjše kot na prvem optičnem vlaknu. Pri časovno nespremenljivih vzorcih se lahko degradaciji kakovosti signala z oddaljenostjo od svetlobnega vira uspešno izognemo tako, da podaljšamo čas osvetlitve s faktorjem, ki je enak upadu reflektance glede na prvo optično vlakno. Pri sodobnih izvedbah tipal v tehnologiji CMOS ali CCD z nizkim temnim tokom, lahko čas osvetlitve običajno podaljšamo do nekaj sekund, pri hlajenih izvedbah tipal pa tudi do več minut. Pri časovno spremenljivih vzorcih, kot so biološka tkiva, lahko tovrsten pristop uporabimo zgolj do meje, ki jo še dopušča časovna dinamika spreminjanja optičnih lastnosti vzorca. Pri praktični izvedbi meritev na površini kože lahko čas osvetlitve na 9. optičnem vlaknu podaljšamo za približno 50-krat, preostali del pa predstavlja izgubo kakovosti signala. Inverzne modele za določanje optičnih lastnosti iz PRR smo najprej ovrednotili na validacijskem podatkovnem nizu, ki temelji na sipalni fazni funkciji GK. Kakovost napovedi optičnih lastnosti smo kvantitativno opredelili s korenem povprečne kvadratne napake (KPKN):

$$KPKN_o = \sqrt{\sum_{i=0}^N \frac{(o_i - o_{r,i})^2}{N}}, \quad (1)$$

kjer $o_{r,i}$ predstavlja referenčno vrednost optične lastnosti validacijskega niza, o_i pripadajočo vrednost optične lastnosti, ki jo napove inverzni regresijski model, N pa število vzorcev.

Slika 6 prikazuje KPKN napovedi absorpcijskega koeficienta v odvisnosti od referenčne vrednosti absorpcijskega in reduciranega sipalnega koeficienta za optične sonde s 3, 5, 7 in 9 sprejemnimi optičnimi vlakni. KPKN pri izbrani vrednosti absorpcijskega μ_a



Slika 5: Razmerje med reflektancama, ki ju izmerimo s prvim in zadnjim optičnim vlaknom, za optične sonde s 3, 5, 7 in 9 sprejemnimi optičnimi vlakni v odvisnosti od optičnih lastnosti vzorca.

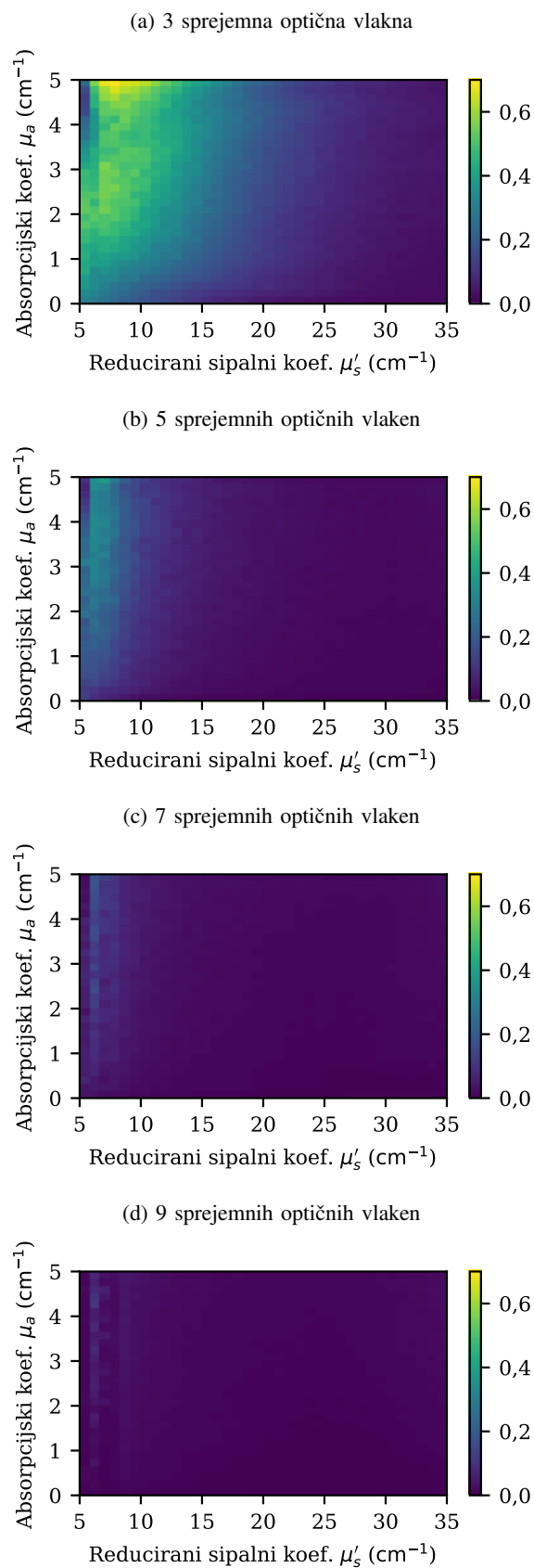
Tabela 1:: Vrednosti KPKN za absorpcijski μ_a in reducirani sipalni μ'_s koeficient ter parameter sipalne fazne funkcije γ .

Optična lastnost	Št. sprejemnih optičnih vlaken			
	3	5	7	9
μ_a (cm ⁻¹)	0,260	0,093	0,036	0,016
μ'_s (cm ⁻¹)	0,521	0,193	0,103	0,078
γ	0,062	0,032	0,018	0,010

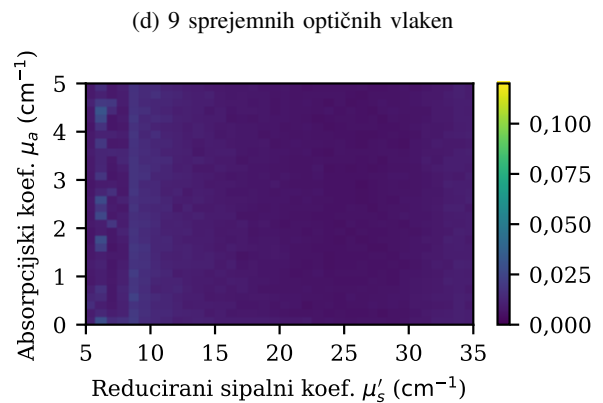
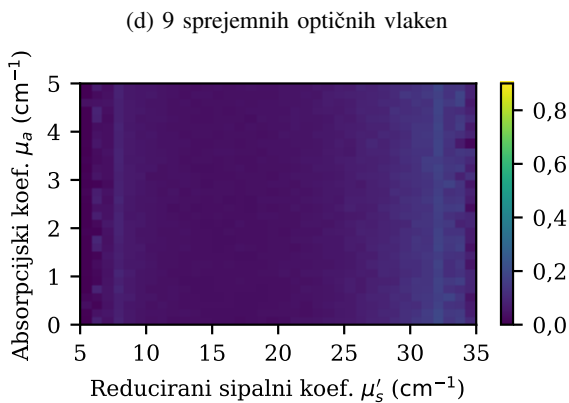
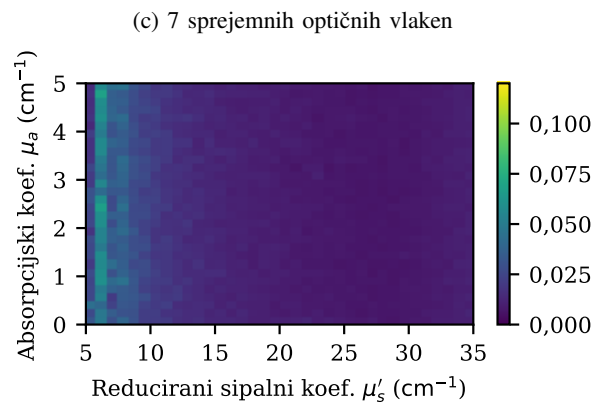
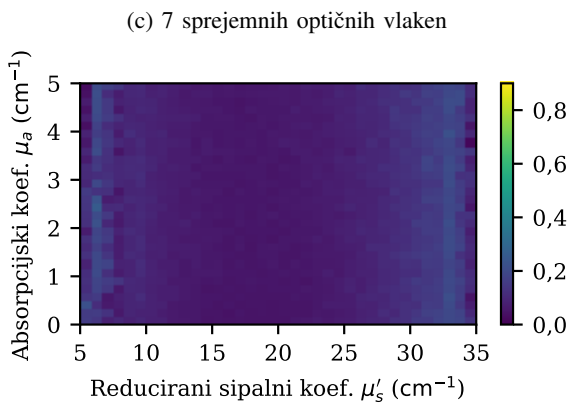
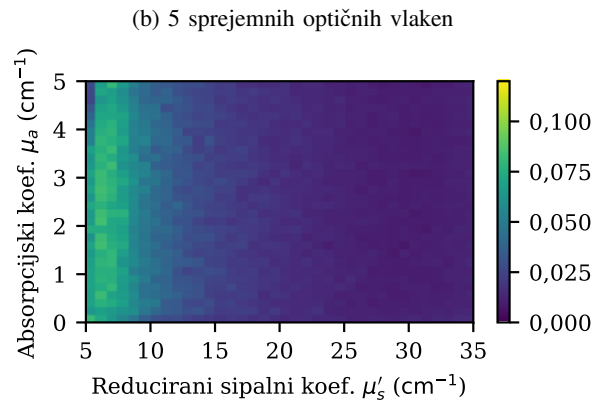
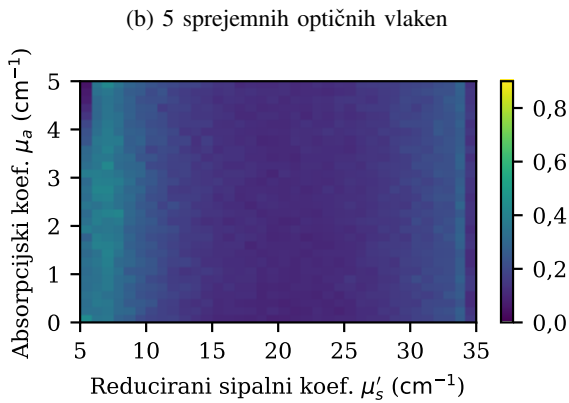
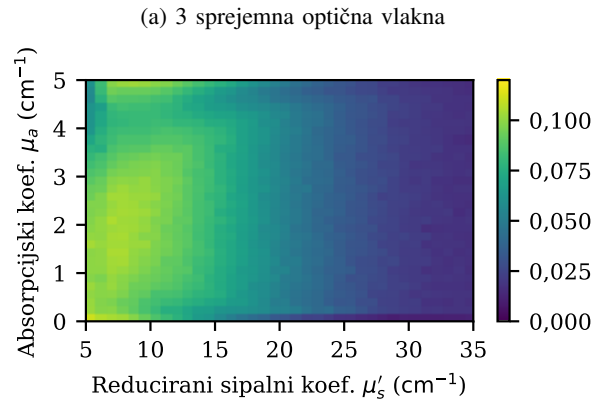
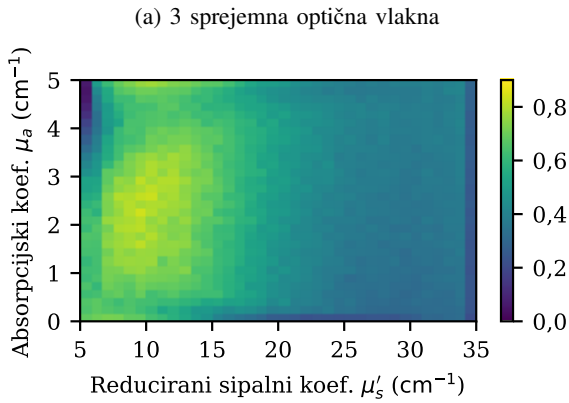
in reduciranega sipalnega μ'_s koeficienta smo izračunali za $N = 41$ vzorčnih točk v ravnini parametrov γ in δ sipalne fazne funkcije. Rezultati kažejo, da prva tri optična vlakna, ki so najbližja svetlobnemu viru, ne nosijo zadostne informacije za kakovostno napoved absorpcijskega koeficienta. Napaka napovedi je še zlasti velika pri nizkem reduciranem sipalnem in visokem absorpcijskem koeficientu, ko je PRR v subdifuzijskem režimu. Pri visokih vrednostih reduciranega sipalnega koeficienta in/ali nizkih vrednostih absorpcijskega koeficienta, ko je PRR v difuzijskem režimu, je napaka napovedi bistveno manjša. Pri optični sondi s 5 sprejemnimi optičnimi vlakni je območje visoke napake omejeno na vzorce z reduciranim sipalnim koeficientom pod 15 cm⁻¹. Če optični sondi dodamo še 2 sprejemni optični vlakni, torej skupaj 7 sprejemnih optičnih vlaken, se območje povečane KPKN dodatno skrči na področje z reduciranim sipalnim koeficientom pod 10 cm⁻¹. Pri optični sondi z 9 optičnimi vlakni pa so napovedi absorpcijskega koeficienta točne na celotnem izbranem območju optičnih lastnosti vzorca.

Podoben potek KPKN v odvisnosti od števila optičnih vlaken dobimo tudi za napovedi reduciranega sipalnega koeficienta μ'_s (slika 7) in parametra sipalne fazne funkcije γ (slika 8). Povprečne vrednosti KPKN za vse tri optične lastnosti in za vse štiri geometrije optične sonde so povzete v tabeli 1.

Za konec napako inverznih regresijskih modelov ovrednotimo še na Miejevih podatkovnih nizih. V ta namen uporabimo validacijske nize, ki temeljijo na sipalni fazni funkciji vodne suspenzije polistirenskih mikrosferičnih delcev premera 0,75 μm in 1,0 μm , ki jih pogosto uporabljamo za kalibracijo inverznih regresijskih modelov. Sipalne fazne funkcije vodnih suspenzij izbranih polistirenskih mikrosferičnih delcev pri valovnih dolžinah 400 nm, 600 nm in 800 nm so prikazane na sliki 2. Vrednosti KPKN za napovedi absorpcijskega in reduciranega sipalnega koeficienta ter parametra γ sipalne fazne funkcije so zbrane v tabelah 2 in 3. Vidimo, da so napake napovedi optičnih lastnosti pri največjem številu sprejemnih vlaken nekoliko višje kot pri validacijskem nizu, ki temelji na sipalni fazni funkciji GK. Takšni rezultati so povsem pričakovani, saj se Miejeva in sipalna fazna funkcija in sipalna fazna funkcija GK pomembno razlikujeta (slika 9). Posledično se tudi PRR pri istih



Slika 6: Koren povprečne kvadratne napake (KPKN) napovedi absorpcijskega koeficienta μ_a v odvisnosti od referenčne vrednosti absorpcijskega μ_a in reduciranega sipalnega koeficienta μ'_s za optične sonde s 3, 5, 7 in 9 sprejemnimi optičnimi vlakni.



Slika 7: Koren povprečne kvadratne napake (KPKN) napovedi reduciranega sipalnega koeficienta μ'_s v odvisnosti od referenčne vrednosti absorpcijskega μ_a in reduciranega sipalnega koeficienta μ'_s za optične sonde s 3, 5, 7 in 9 sprejemnimi optičnimi vlakni.

Slika 8: Koren povprečne kvadratne napake (KPKN) napovedi parametra sipalne fazne funkcije γ v odvisnosti od referenčne vrednosti absorpcijskega μ_a in reduciranega sipalnega koeficienta μ'_s za optične sonde s 3, 5, 7 in 9 sprejemnimi optičnimi vlakni.

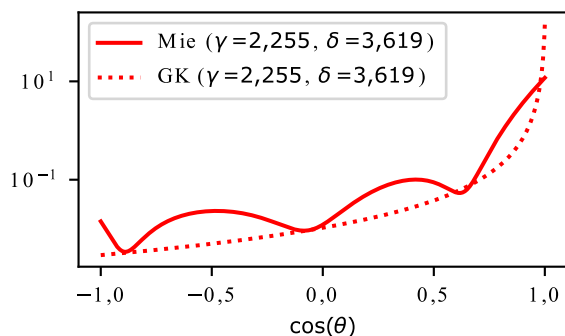
Tabela 2:: Vrednosti KPKN za absorpcijski μ_a in reducirani sipalni μ'_s koeficient ter parameter sipalne fazne funkcije γ , ki jih dobimo za Miejev podatkovni niz mikrosferičnih delcev premera $0,75 \mu\text{m}$.

Optična lastnost	Št. sprejemnih optičnih vlaken			
	3	5	7	9
μ_a (cm^{-1})	0,607	0,106	0,042	0,017
μ'_s (cm^{-1})	0,957	0,176	0,129	0,101
γ	0,100	0,031	0,024	0,029

Tabela 3:: Vrednosti KPKN za absorpcijski μ_a in reducirani sipalni μ'_s koeficient ter parameter sipalne fazne funkcije γ , ki jih dobimo za Miejev podatkovni niz mikrosferičnih delcev premera $1 \mu\text{m}$.

Optična lastnost	Št. sprejemnih optičnih vlaken			
	3	5	7	9
μ_a (cm^{-1})	0,622	0,081	0,033	0,014
μ'_s (cm^{-1})	1,013	0,154	0,112	0,094
γ	0,100	0,021	0,016	0,015

vrednostih parametrov sipalne fazne funkcije γ in δ lahko razlikujeta, še zlasti v subdifuzijskem režimu, kjer je vpliv oblike sipalne fazne funkcije, tj. Legedrovih momentov višjega reda, na PRR izrazitejši.



Slika 9: Primera Miejeve sipalne fazne funkcije in GK sipalne fazne funkcije z enakima vrednostma parametrov γ in δ , a s sorazmerno različnima podrobnima potekoma verjetnostne porazdelitve kotov sipanja θ . Prikazana Miejeva sipalna fazna funkcija predstavlja vodno suspenzijo mikrosferičnih polistirenskih delcev premera $0,75 \mu\text{m}$ za svetlobo valovne dolžine 660nm .

4 SKLEP

V študiji smo kvantitativno ovrednotili kakovost napovedi inverznih regresijskih modelov v odvisnosti od števila optičnih vlaken, s katerimi zajamemo radialni potek intenzitete povratno sipane svetlobe iz sipajočega vzorca. V ta namen smo izbrali optične sonde s strnjeno

linearno razporeditvijo 3, 5, 7, ali 9 sprejemnih optičnih vlaken s sredico premera $200 \mu\text{m}$ in numerično odprtino 0,22. Za vsako izmed optičnih sond smo pripravili ločene inverzne regresijske modele za določanje absorpcijskega koeficienta, reduciranega sipalnega koeficienta in parametra γ sipalne fazne funkcije. Rezultati inverznih modelov kažejo, da je za točne napovedi optičnih lastnosti potrebno uporabiti optično sondo z vsaj 5 sprejemnimi optičnimi vlakni. V primeru, ko imamo opravka z vzorci, ki izkazujejo nizek reducirani sipalni koeficient, pa je treba uporabiti optične sonde s 7 ali 9 sprejemnimi optičnimi vlakni. Z optično sondo, ki vsebuje zgolj 3 sprejemna optična vlakna, je zadovoljivo točne napovedi optičnih lastnosti mogoče doseči le pri visokih vrednostih reduciranega sipalnega koeficienta in zanemarljivo nizki absorpciji.

ZAHVALA

Raziskavo je omogočila Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v okviru programa P2-0232 ter projektov J2-2502, J2-2500 in J2-1732.

LITERATURA

- [1] F. Bevilacqua and C. Depeursinge, "Monte Carlo study of diffuse reflectance at source-detector separations close to one transport mean free path," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 16, no. 12, p. 2935, Dec. 1999.
- [2] K. W. Calabro and I. J. Bigio, "Influence of the phase function in generalized diffuse reflectance models: Review of current formalisms and novel observations," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 19, no. 7, pp. 075 005–075 005, 2014.
- [3] S. C. Kanick, D. M. McClatchy, V. Krishnaswamy, J. T. Elliott, K. D. Paulsen, and B. W. Pogue, "Sub-diffusive scattering parameter maps recovered using wide-field high-frequency structured light imaging," *Biomedical Optics Express*, vol. 5, no. 10, p. 3376, Oct. 2014.
- [4] N. Bodenschatz, P. Krauter, A. Liemert, and A. Kienle, "Quantifying phase function influence in sub-diffusively backscattered light," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 21, no. 3, pp. 035 002–035 002, 2016.
- [5] D. M. McClatchy III, E. J. Rizzo, W. A. Wells, P. P. Cheney, J. C. Hwang, K. D. Paulsen, B. W. Pogue, and S. C. Kanick, "Wide-field quantitative imaging of tissue microstructure using sub-diffuse spatial frequency domain imaging," *Optica*, vol. 3, no. 6, p. 613, Jun. 2016.
- [6] J. J. Bravo, K. D. Paulsen, D. W. Roberts, and S. C. Kanick, "Sub-diffuse optical biomarkers characterize localized microstructure and function of cortex and malignant tumor," *Optics Letters*, vol. 41, no. 4, p. 781, Feb. 2016.

- [7] P. Naglič, F. Pernuš, B. Likar, and M. Bürmen, "Estimation of optical properties by spatially resolved reflectance spectroscopy in the subdiffusive regime," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 21, no. 9, pp. 095 003–095 003, 2016.
- [8] P. Naglič, F. Pernuš, B. Likar, and M. Bürmen, "Adopting higher-order similarity relations for improved estimation of optical properties from subdiffusive reflectance," *Optics Letters*, vol. 42, no. 7, pp. 1357–1360, Apr. 2017.
- [9] A. L. Post, S. L. Jacques, H. J. C. M. Sterenborg, D. J. Faber, and T. G. van Leeuwen, "Modeling subdiffusive light scattering by incorporating the tissue phase function and detector numerical aperture," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 22, no. 5, pp. 050 501–050 501, 2017.
- [10] A. Liemert, D. Reitzle, and A. Kienle, "Analytical solutions of the radiative transport equation for turbid and fluorescent layered media," *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, p. 3819, Jun. 2017.
- [11] A. Liemert and A. Kienle, "Exact and efficient solution of the radiative transport equation for the semi-infinite medium," *Scientific Reports*, vol. 3, Jun. 2013.
- [12] A. Liemert and A. Kienle, "Spatially modulated light source obliquely incident on a semi-infinite scattering medium," *Optics Letters*, vol. 37, no. 19, pp. 4158–4160, Oct. 2012.
- [13] E. Vitkin, V. Turzhitsky, L. Qiu, L. Guo, I. Itzkan, E. B. Hanlon, and L. T. Perelman, "Photon diffusion near the point-of-entry in anisotropically scattering turbid media," *Nature Communications*, vol. 2, p. 587, Dec. 2011.
- [14] P. Naglič, F. Pernuš, B. Likar, and M. Bürmen, "Limitations of the commonly used simplified laterally uniform optical fiber probe-tissue interface in Monte Carlo simulations of diffuse reflectance," *Biomedical Optics Express*, vol. 6, no. 10, p. 3973, Oct. 2015.
- [15] B. Majaron, M. Milanič, and J. Premru, "Monte Carlo simulation of radiation transport in human skin with rigorous treatment of curved tissue boundaries," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 20, no. 1, pp. 015 002–015 002, 2015.
- [16] C. Zhu and Q. Liu, "Review of Monte Carlo modeling of light transport in tissues," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 18, no. 5, pp. 050 902–050 902, 2013.
- [17] M. Bürmen, "Vpliv zmanjšanja simulacijskega volumna na napako in hitrost izračunov reflektance z metodo monte carlo," vol. 84, no. 1-2, pp. 61–65, 2017.
- [18] R. Hennessy, S. L. Lim, M. K. Markey, and J. W. Tunnell, "Monte Carlo lookup table-based inverse model for extracting optical properties from tissue-simulating phantoms using diffuse reflectance spectroscopy," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 18, no. 3, pp. 037 003–037 003, 2013.
- [19] B. S. Nichols, N. Rajaram, and J. W. Tunnell, "Performance of a lookup table-based approach for measuring tissue optical properties with diffuse optical spectroscopy," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 17, no. 5, p. 057001, May 2012.
- [20] N. Rajaram, T. H. Nguyen, and J. W. Tunnell, "Lookup table-based inverse model for determining optical properties of turbid media," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 13, no. 5, pp. 050 501–050 501–3, 2008.
- [21] I. Fredriksson, M. Larsson, and T. Strömberg, "Inverse Monte Carlo method in a multilayered tissue model for diffuse reflectance spectroscopy," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 17, no. 4, pp. 047 004–047 004, 2012.
- [22] M. Ivančič, P. Naglič, and M. Bürmen, "Določanje optičnih lastnosti sipajočih medijev s hiperspektralnim slikanjem," vol. 86, no. 4, pp. 175–184, 2019.
- [23] M. Ivančič, P. Naglič, F. Pernuš, B. Likar, and M. Bürmen, "Efficient estimation of subdiffusive optical parameters in real time from spatially resolved reflectance by artificial neural networks," *Optics Letters*, vol. 43, no. 12, pp. 2901–2904, Jun. 2018.
- [24] Y. Zelinskyi, P. Naglič, F. Pernuš, B. Likar, and M. Bürmen, "Fast and accurate Monte Carlo simulations of subdiffusive spatially resolved reflectance for a realistic optical fiber probe tip model aided by a deep neural network," *Biomedical Optics Express*, vol. 11, no. 7, pp. 3875–3889, Jul. 2020, publisher: Optical Society of America.
- [25] P. Naglič, Y. Zelinskyi, L. Rogelj, J. Stergar, M. Milanič, J. Novak, B. Kumperščak, and M. Bürmen, "Optical properties of PlatSil SiliGlass tissue-mimicking phantoms," *Biomedical Optics Express*, vol. 11, no. 7, pp. 3753–3768, Jul. 2020, publisher: Optical Society of America.

Miran Bürmen je zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer se pedagoško in raziskovalno ukvarja s spektroskopijo in hiperspektralnim slikanjem, modeliranjem spektroskopskih in hiperspektralnih slikovnih sistemov, obdelavo in analizo spektrov in hiperspektralnih slik ter modeliranjem širjenja svetlobe po sipajočih medijih.