

# Rekonstrukcija 1-dimenzionalne slike zajete s pomočjo THz spektroskopa v frekvenčni domeni

Blaž Pongrac<sup>1</sup>, Andrej Sarjaš<sup>1</sup>, Dušan Gleich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, Slovenija  
E-pošta: blaz.pongrac1@um.si

## 1-Dimensional image reconstruction for THz-FDS

*In this paper, 1-dimensional image reconstruction based on Gauss spotlight is presented. Terahertz Frequency Domain Spectroscopy (THz-FDS) system is presented and based on the analysis of most current THz-FDS systems, image acquisition and reconstruction is proposed. From measured phase fringes, peak envelope and phase are extracted. After that, Gauss spotlight filter for resolution and contrast enhancement is introduced. In the last processing stage, image compression is performed and 1-dimensional image is created. Proposed method shows great promise for image reconstruction for data acquired using THz-FDS systems.*

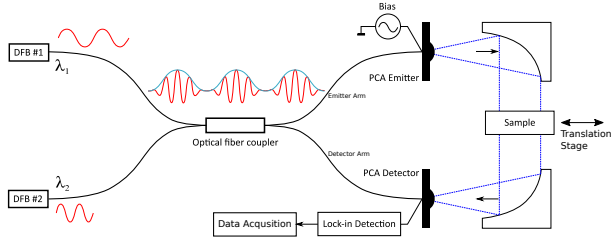
## 1 Uvod

Terahertzna (THz) tehnologija je postala kritično orodje pri ne invazivnem in ne destruktivnem testiranju ter analizi materialov v kemiji [1], biologiji [2], kmetijstvu [3] in mnogih drugih področjih. Na trgu je pomanjkanje komercialno dosegljivih THz naprav, kot so generatorji, valovodi, in detektorji. Najbolj obetavne so opto-elektronske metode, kjer za oddajanje in zaznavanje THz valov uporabljamo foto-prevodne antene (FPA). Testiranja in analize materialov s THz valovi se izvaja s spektroskopijo, ki jo delimo na spektroskopijo v časovni domeni (ang. Time-Domain Spectroscopy, TDS) ali spektroskopijo v frekvenčni domeni (ang. Frequency-Domain Spectroscopy, FDS). Opto-elektronski sistemi TDS uporabljajo fs-laserje za generiranje širokopasovnega signala, opto-elektronski sistemi FDS pa uporabljajo množenje dveh optičnih signalov z različnimi valovnimi dolžinami. Večina aplikacije za testiranje in analizo materialov, naprimer analiza prikazana v [4], temeljijo na TDS sistemih. Glavni razlog za to je visoka hitrost zajemanja podatkov in dostopnejše THz naprave. Kljub temu FDS sistemi nudijo večjo prilagodljivost, imajo višjo frekvenco ločljivosti in so cenejši od trenutnega sistema FDS. Slabosti FDS sistema sta nizka hitrost zajemanja in slaba ponovljivost. V zadnjih letih so se močno razvile slikovne tehnike s THz valovi na osnovi TDS, predvsem zajem rastrske slike [5], radar s sintetično aperturo (SAR) [6], kompresijsko zaznavanje [7] in druge tehnike. THz valovi, ki se nahajajo v frekvenčnem pasu med 0,1 THz in 10 THz [8] ali valovi z valovno dolžino med 3 mm in 30  $\mu\text{m}$ , so

neionizirajoči valovi. Slednje omogoča ne-destruktivno zajemanje slik. THz slikovne aplikacije so bile razvite na področju medicine [5] in varnosti [9]. Prav tako so bile razvite različne tehnike za izboljšanje ločljivosti in kontrasta THz slike, kot sta kompresijsko slikanje [10] in dekonvolucija [11]. Medtem ko razvoj THz slik temelji predvsem na TDS sistemi, so bile razvite nekatere aplikacije tudi z FDS THz sistemi, kot je prikazano v [12]. Zajem slik s sistemom THz FDS se je izkazal za primernejšega v biomedicinskih aplikacijah [13]. Avtorji so v [13] zajem slik s pomočjo razdelili na točkovno slikanje, zajem slik v celotnem vidnem polju in tridimenzionalno slikanje. Točkovno oz. rastrsko skeniranje slik zajame slikovno točko za slikovno točko opazovanega objekta. Slikanje celotnega polja uporablja niz detektorjev ali uporablja kompresijsko slikanje oz. druge tehnike. THz tridimenzionalno oz. holografsko slikanje uporablja naprednejše in drage naprave. V tem prispevku je predlagan novi pristop, hibrid med eno točkovnim skeniranje in slikanje celotnega polja. Uporablja je bil standardni THz FDS sistem v prehodnem režimu. Generirani so bili THz valovi s frekvenco med 710 GHz in 810 GHz. Uporabljeno je bilo koherentno zaznavanje THz valovanja, kar nam omogoča oceno jakosti in faznega premika zaznanih THz valov. Jakost in fazni premik zaznanih THz valov nam zagotovita spektralne informacije, ki jih lahko uporabimo pri analizi zajete slike. Slika je bila zajeta s pomočjo ene kinetične stopnje premikanja. Rekonstrukcija slike temelji na oceni jakosti in faznega premika. S pomočjo predlagane metode množenja z Gaussovimi snopom pa lahko izboljšamo ločljivost in kontrast zajetih slik. Eksperimentalni rezultati so pokazali, da je prikazana metoda primerna za rekonstrukcijo 1-dimenzionalne (1D) slike zajete s pomočjo THz FDS sistema.

## 2 THz FDS sistem v prehodnem režimu

THz FDS sistem temelji na množenju dveh optičnih signalov z različnimi valovnimi dolžinami, kot je prikazano na Sliki 1. Kot vir optičnih valov se uporabljata dva nastavljiva laserja s porazdeljeno povratno vezavo (DFB), vsak s svojo valovno dolžino  $\lambda_1$  in  $\lambda_2$ . Oba optična signala se nato množita v optičnem spojnik, nastali optični signal pa je moduliran s frekvenco  $\nu$ . Nastavljanje valovne dolžine običajno poteka s segrevanjem ali hlajenjem DFB laserske diode. S sprememba temperature se spremeni lomni



Slika 1: THz-FDS System

količnik aktivnega območja DFB laserske diode in valovna dolžina oddanega optičnega vala se bo premaknil. Pri tem se ohrani širina spektralne črte. Zaradi mase in termične vztrajnosti DFB laserske diode je premik valovne dolžine s hlajenjem ali segrevanjem počasen proces in ni primerno za hitre premiki valovnih dolžin [14].

V FDS sistemu v prehodnem režimu oddani THz žarek iz FPA oddajnika s pomočjo paraboličnih zrcal kolimiramo skozi vzorec in nato usmerimo v FPA detektor. Izmerjena značilnost je prepustnost ali koliko oddanega polja je prešlo skozi merjeni medij. Prepustnost  $T$  lahko ocenimo kot:

$$T \approx \frac{I_T}{I_0} \quad (1)$$

kjer je  $I_T$  izmerjena jakost z vzorcem, ki ovira pot THz žarka,  $I_0$  pa je referenčna jakost z neovirana pot THz žarka. Če predpostavimo, da sta dolžini kraka sprejemnika in oddajnika na sliki 1 enaki, lahko referenčno jakost  $I_0$  na sprejemniku ocenimo kot:

$$I_0(\nu) = E_{THz} \cos(2\pi\nu \cdot L/c) \quad (2)$$

kjer je  $E_{THz}$  vpadno THz polje na FPA sprejemniku in  $L$  je razdalja med antenama. Iz (2) lahko vidimo, da zaznana THz polje niha s periodo  $\Delta\nu = c/L$ . Perioda zaznanega faznega nihanja je ločljivost, s katero lahko izluščimo amplitudo in fazo zaznanega THz polja. Sistem FDS v prehodnem režimu se osredotoča na frekvenčno odvisnost absorpcije in disperzije v opazovanem mediju. Absorpcija vpliva na amplitudo THz valov in jo je mogoče opisati s frekvenčno odvisnim absorpcijskim koeficientom  $\alpha(\nu)$ . Intenzivnost  $I_T$  je mogoče opisati kot:

$$I_T(\nu) = I_0 e^{-\alpha(\nu)d} \quad (3)$$

kjer je  $d$  globina širjenja ali debelina opazovanega materiala. Disperzija v mediju bo povzročila spremembo hitrosti potovanja valov v mediju, kar bo povzročilo fazno premaknitev. Fazno razliko zaradi disperzije v mediju  $\Delta\phi_D$  lahko ocenimo kot:

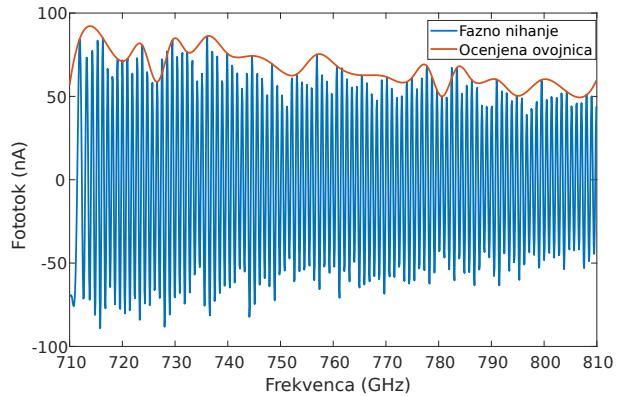
$$\Delta\phi_D = \frac{2 \cdot \pi \cdot \nu}{c} \cdot (n_2 - n_1) \cdot d \quad (4)$$

kjer sta lomna količnika dveh različnih materialov  $n_1 \ll n_2$ . S kombinacijo (2), (3) in (4) lahko jakost  $I_T$  ocenimo kot:

$$I_T(\nu) = E_{THz} e^{-\alpha(\nu)d} \cos(2\pi\nu \cdot L/c + \Delta\phi_D) \quad (5)$$

Najpogostejša uporabljena metoda zaznavanja koherentnih THz valov s predstavljenim sistemom FDS uporablja

konstantno razdaljo med FPA oddajnikom in FPA detektorjem ( $L = \text{const.}$ ) ter s spreminjanjem frekvence  $\nu$  s konstantnim korakom. FPA oddajnik napajamo z električnim signalom s znano frekvenco, kar nam omogoča detekcijo faze s pomočjo zaklepnega ojačevalnika. Amplitudo zaznanega polja THz je mogoče oceniti z identifikacijo ovojnice  $I_T$ . Ovojnico lahko ocenimo z določitvijo maksimumov zaznanega faznega nihanja in polinomsko interpolacijo. Fazni premik lahko ocenimo z identifikacijo prehoda ničelne vrednosti in linearno interpolacijo. Izmerjeno fazno nihanje in ocenjena ovojnica so predstavljeni na Sliki 2. Eden večjih problemov predstavlje-



Slika 2: Merjeno fazno nihanje zaznanega fototoka v FPA detektorju in ocenjena ovojnica.

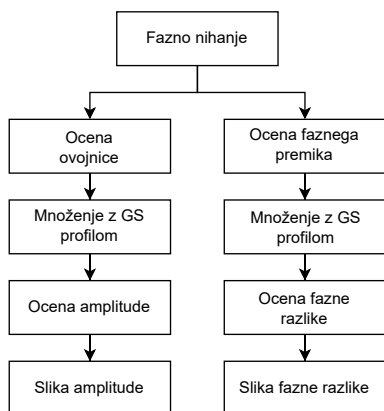
nega sistema FDS THz je točnost nastavljanje frekvence. Razmerje med temperatura in oddano valovno dolžino v DFB laserski diodi je empirično določeno, istočasno pa je ponovljivost nastavljanja frekvence majhna. Med izvajanjem frekvenčnih premikov je dejanska frekvenca le redko enaka ciljni frekvenci. Popačenje ciljne frekvence postane pomemben problem s kratkim časom integracije merjenega inducirane fototoka v FPA detektorju. Frekvenčno skeniranje v predstavljenem THz FDS sistemu je počasno in odvisno od želene frekvenčne ločljivosti ter frekvenčnega območja. Pogosta rešitev počasnega nastavljanja frekvence je dvosmerni premik frekvence  $\nu$ .

### 3 Predlagana metoda rekonstrukcije slike

Algoritem za rekonstrukcijo slike je prikazan na Sliki 3. Vključuje oceno ovojnice in iz ocene faznega premika. V naslednjem koraku se ocenjena ovojnica in fazni premik množita z Gaussovimi snopom, v zadnjem koraku pa se izvede kompresija podatkov, s katero dobimo 1D sliko. Kompresija intenzivnosti se izvede kot vsota amplitude znotraj določenega spektralnega območja:

$$\bar{I} = \sum_{f=\nu_0}^{\nu} P_T(f) \quad (6)$$

kjer je  $\nu_0$  začetna frekvenca v premiku in  $\nu$  končna frekvenca v premiku,  $P_T$  pa je ocenjena ovojnica. S seštevanjem vrednosti amplitud v spektralnem območju  $B = \nu - \nu_0$ , dobimo jakost v frekvenčnem pasu, ki predstavlja ampli-



Slika 3: Predlagan algoritem rekonstrukcije slike.

tudo ekvivalentnega širokopasovnega signala z enako pasovno širino. Fazna kompresija je izvedena kot ocena fazne razlike:

$$\overline{\Delta\phi} = \phi(\nu) - \phi(\nu_0) = \phi(\nu) \quad (7)$$

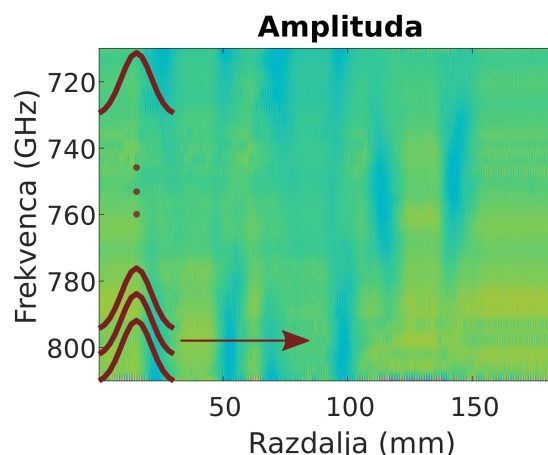
kjer je  $\phi(\nu_0) = 0$  fazni premik na začetni frekvenci in  $\phi(\nu)$  je odviti fazni premik na zadnji frekvenca v frekvenčnem premiku.

### 3.1 Množenje z Gausovim snopom

Avtorji v [15] navajajo, da ima v preseku jakost THz žarka oddanega iz FPA Gaussov profil. Sama FPA praviloma oddaja THz valove pod širokom kotom. Lahko pa THz valove kolimiramo v žarek s pomočjo ustreznih silicijevih več in paraboličnih zrcal. Gaussov profil jakosti THz žarka se bo ohranil tudi po kolimaciji. Opazovani vzorec je v uporabljenem THz FDS sistemu postavljen pravokotno na pot Thz žarka. Zato se kolimirani THz žarek širi skozi vzorec z Gausovim profilom. Gaussov profil so v [11] že uporabili za izboljšanje ločljivosti in kontrasta pri zajemu slike s THz TDS sistemom. Predlagana rešitev v tem prispevku uporablja enodimenzionalni Gaussov profil (GP), s katerim lahko omilimo napako zaradi točnosti nastavljanja frekvence v THz TDS sistemu in napake zaradi dvosmernega premika frekvence ter izboljšamo kontrast zajete slike. Koncept množenja z GP je prikazan na Sliki 4. Širina THz snopa je bilo empirično določeno za uporabljene FPA, in sicer je premer snopa 8 mm. Velikost enodimenzionalnega GP je neposredno vezana na korak premika linearne tirnice, v našem primeru na 0,5 mm. Zato je širina GP nastavljena na 16 vzorcev.

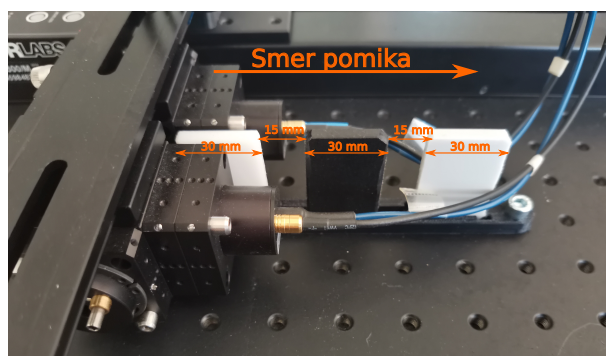
## 4 Eksperimentalni rezultati

Predlagani algoritem za rekonstrukcijo slike je bil preverjen z uporabo standardnega sistema THz FDS. Cilj je bil ustvariti 1D sliko različnih materialov, kjer bi jih bilo mogoče ločiti med seboj in zraka okrog njih. Vzorec s tremi različnimi material je bil pripravljen in je prikazan na Sliki 5. Plastične plošče so široke 30 mm in debele 5 mm ter so nameščene 15 mm narazen. Vsi pripravljeni materiali temeljijo na polietilenu (PE), saj je PE prozoren za THz valove. Vsak material ima različno gostoto in



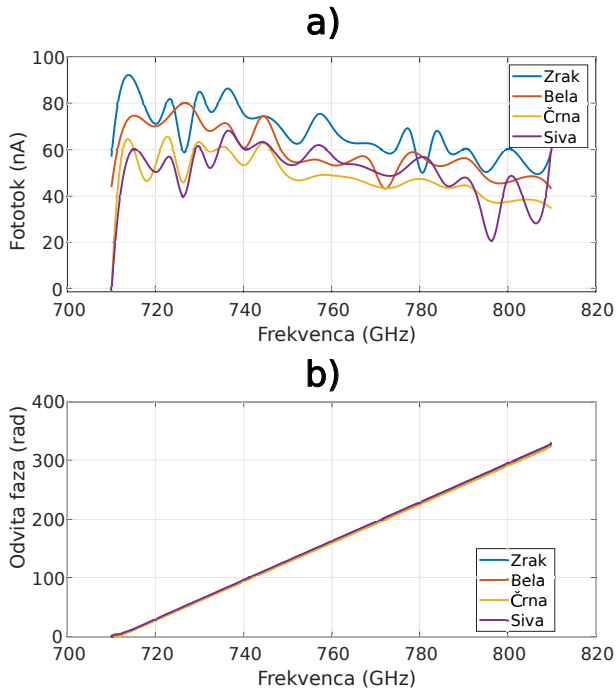
Slika 4: Prikaz predlaganega množenja zajete THz slike z GP. Vzorci pri enakih ciljnih frekvencah so pomnoženi z načrtanim GP v smeri linearnega premika.

različne dodatke, zaradi česar so spektralno ločljivi. Materiali so komercialni izdelek podjetja Isokon. Dodatkov ni mogoče razkriti saj so poslovna skrivnost proizvajalca.

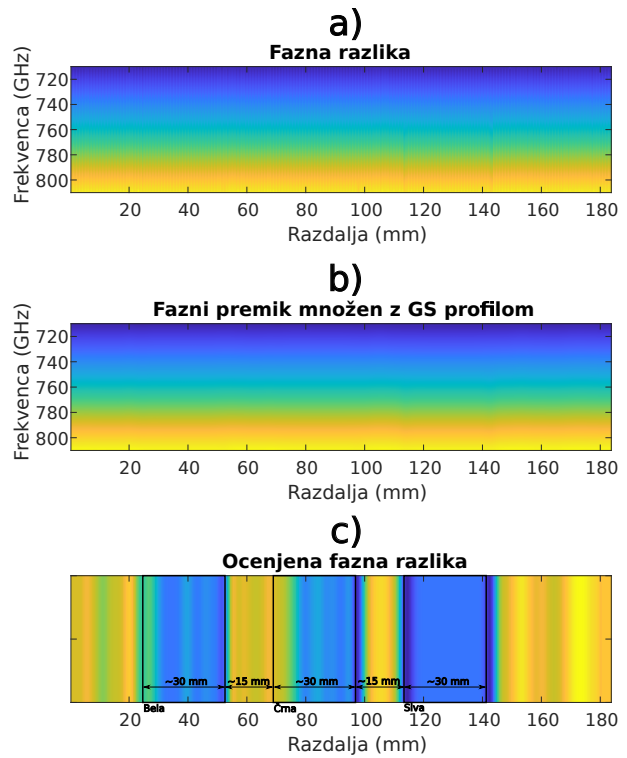


Slika 5: Vzorec sestavljen iz plastičnih plošči, ki je vstavljen med obe anteni. Slika prikazuje tudi smer linearnega premika.

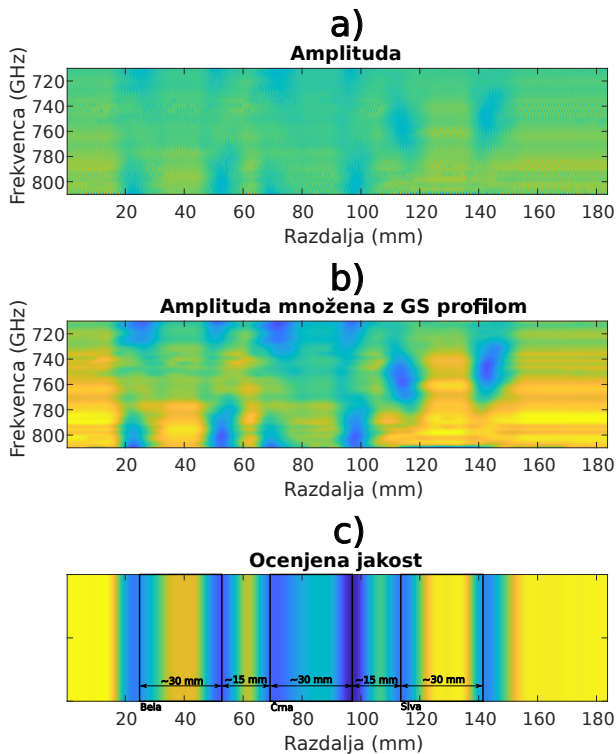
Merilna proga temelji na komercialnem THz FDS sistemu TeraScan 1550 proizvajalca Toptica Photonics. S TeraScan 1550 lahko generiramo periodične valove med 50 1210 GHz z uporabo para FPA kot generator in detektor THz valov. Za linearni premik je uporabljena LTS300/M linearna tirnica proizvajalca Thorlabs. Merilna proga je prikazana na Sliki 1. Hitrost in pospešek linearne tirnice LTS300/M sta nastavljena na 1 mm/s in 0,1 mm/s<sup>2</sup>, korak premika pa na 0,5 mm. Spektralno območje (tj. začetna frekvenca in končna frekvenca v premiku) je bila določena z opazovanjem spektralne značilnosti vsakega izmerjenega materiala. Na podlagi opazovanja sta bili začetna in končna frekvenca določeni kot  $\nu_0 = 710$  GHz in  $\nu = 810$  GHz, kjer je pasovna širina  $B = 100$  GHz. Korak frekvenčnega pomika je bil nastavljen na 0,1 GHz, integracijski čas pa je bil 30 ms. Slika 6 prikazuje ocenjeno ovojnico zaznanega faznega nihanja in ocenjeno odvito fazo za vsaki material, nameščenim znotraj poti THz žarka in za neblokirana pot THz žarka. Vidimo lahko, da lahko razločimo vsaki uporabljen material in zrak okoli vzorca. Sliki 7a in sliki 8a so prikazane



Slika 6: Meritev enega frekvenčnega premika: a) Ocenjena ovojnica oz. amplituda, b) Ocenjen odviti fazni premik.



Slika 8: Eksperimentalni rezultati: a) Ocenjeni odviti fazni premiki za vse merjene frekvenčne premike, b) Rezultat množenja odviten faznih premikov z GP, c) Rekonstruirana 1D slika faznih razlik.



Slika 7: Eksperimentalni rezultati: a) Ocenjene ovojnice za vse merjene frekvenčne premike, b) Rezultat množenja ovojnic z GP, c) Rekonstruirana 1D slika amplitude.

ocenjene ovojnice (amplituda) in ocenjen fazni. Nekatere značilnosti so vidne na sliki ocenjene amplitude vendar ne dovolj za razlikovanje med materiali in zrakom, medtem ko na fazni sliki ni možno razločiti med različnimi materiali. Sliki 7b in sliki 8b prikazujeta amplitudno in fazno sliko po množenju z GP. Kontrast amplitudnega spektra je bil izboljšán, medtem ko so učinki dvosmerne frekvenčnega premika bili odpravljeni. Slika 7c in Slika 8c prikazuje 1D sliko amplitude in enodimenzionalno sliko fazne razlike. Na obeh slikah lahko razločimo različne materiale in zrak okrog njih. Iz prikazanih 1D slik, lahko vidimo sipanje THz valov na meji med materiali z različnimi lomni količniki. Razdalja med plastičnimi ploščami in širina plastičnih plošč je skladna s pripravljenim vzorcem.

## 5 Sklep

V prispevku je predstavljena raziskava inovativnega pristopa k zajemu THz slike s pomočjo THz spektrometra v frekvenčni domeni. Predlagana metoda zajema slike temelji na zajemu širše pasovne širine, z izbrano spektralno resolucijo. Obdelava zajetih podatkov temelji na oceni ovojnice, s katero ocenimo amplitudni spekter, in oceni faze zajetega signala, s katero ocenimo fazni spekter. Amplitudni in fazni spekter sta dodatno obdelana s pomočjo množenja z GP. Množenje z GP temelji na predpostavki, da je profil svetlobne jakosti v THz žarku opisan z Gaussovo funkcijo. Iz prikazanih rezultatov lahko razberemo, da s pomočjo predlaganega množenja z GP

izboljšamo resolucijo v zajeti 1D sliki. Iz rezultatov je razvidno, da je množenje z GP manj učinkovito pri izboljšanju kontrasta faznega spektra. Predlagano GS sito ne izboljšamo samo resolucije, ampak do neke mere kompenzira tudi slabosti THz spektrometra v frekvenčni domeni, kot sta izkrivljenost zaradi dvosmerne spremijnjanja frekvence in izkrivljenost zaradi neponovljivosti nastavljanja frekvence THz valov. S pristopi predstavljene nima v tem prispevku smo hitrost zajema slike znižali. Prav tako smo omogočili koherentno zajemanje signalov, kar ohrani frekvenčne karakteristike opazovanega medija. Predstavljen pristop predstavlja predhodno raziskavo. Z nadaljnjimi raziskavami lahko predlagan pristop razširimo na zajem in rekonstrukcijo 2D slike.

Raziskave in razvoj so bile sofinancirane s strani ARRS, št. projekta J7-9408.

## Literatura

- [1] Shi, C., Ma, Y., Zhang, J., Wei, D., Wang, H., Peng, X., Tang, M., Yan, S., Zuo, G., Du, C., and Cui, H., "Terahertz time-domain spectroscopy of chondroitin sulfate," *Biomedical Optics Express*, 9(3), 1350, 2018
- [2] Lu, J.-H., Chen, C., Huang, C., Leu, S.-Y., and Lee, D.-J., "Glucose fermentation with biochar amended consortium: Sequential fermentations," *Bioresource Technology*, 122933, 2020
- [3] Ren, A., Zahid, A., Imran, M. A., Alomainy, A., Fan, D., and Abbasi, Q. H., "Terahertz sensing for fruit spoilage monitoring," 2019 2nd International Workshop on Mobile Terahertz Systems, IWMTS 2019, 1–4, 2019
- [4] Fuse, N., and Sugae, K., "Non-destructive terahertz imaging of alkali products in coated steels with cathodic disbanding," *Progress in Organic Coatings*, 137, 105334, 2019
- [5] Stubling, E. M., Rehn, A., Siebrecht, T., Bauckhage, Y., Öhrström, L., Eppenberger, P., Balzer, J. C., Rühli, F., and Koch, M., "Application of a robotic THz imaging system for sub-surface analysis of ancient human remains," *Scientific Reports*, 9(1), 1–8, 2019
- [6] Batra, A., Barowski, J., Damyanov, D., Wiemeler, M., Rolles, I., Schultze, T., Balzer, J. C., Gohringer, D., and Kaiser, T., "Short-Range SAR Imaging From GHz to THz Waves," *IEEE Journal of Microwaves*, 1(2), 574–585, 2021
- [7] Zanutto, L., Piccoli, R., Dong, J., Caraffini, D., Morandotti, R., and Razzari, L., "Time-domain terahertz compressive imaging," *Optics Express*, 28(3), 3795, 2020
- [8] Lee, Y.-S., "Principles of Terahertz Science and Technology," Springer US, 2009
- [9] Tzydynzhapov, G., Gusikhin, P., Muravev, V., Dremin, A., Nefyodov, Y., and Kukushkin, I., "New Real-Time Sub-Terahertz Security Body Scanner," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 41(6), 632–641, 2020
- [10] Gu, S., Xi, G., Ge, L., Yang, Z., Wang, Y., Chen, W., and Yu, Z., "Compressed Sensing for THz FMCW Radar 3D Imaging," *Complexity*, 2021.
- [11] Ahi, K., and Anwar, M., "Developing terahertz imaging equation and enhancement of the resolution of terahertz images using deconvolution," *Terahertz Physics, Devices, and Systems X: Advanced Applications in Industry and Defense*, 9856(May 2016), 98560N, 2016
- [12] Zhang, Y., Wang, C., Huai, B., Wang, S., Zhang, Y., Wang, D., Rong, L., and Zheng, Y., "Continuous-wave thz imaging for biomedical samples," *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(1), 1–26, 2021
- [13] Valusis, G., Lissauskas, A., Yuan, H., Knap, W., and Roskos, H. G., "Roadmap of terahertz imaging 2021," *Sensors*, 21(12), 1–51, 2021
- [14] Pongrac, B., Donlagic, D., Njegovec, M., and Gleich, D., "THz Signal Generator Using a Single DFB Laser Diode and the Unbalanced Optical Fiber Interferometer," *Sensors*, 20(17), 2020
- [15] Jepsen, P. U., and Keiding, S. R., "Radiation patterns from lens-coupled terahertz antennas," *Opt. Lett.* 20, 807-809, 1995