

Generator THz optičnega signala z DFB lasersko diodo

Blaž Pongrac¹, Dušan Gleich¹

¹Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija
E-pošta: blaz.pongrac1@um.si

THz signal generator using a Single DFB Laser Diode

This paper presents a frequency-modulated optical signal generator in the THz band. The proposed method is based on a fast optical frequency sweep of a single narrowband laser diode used together with an optical fiber interferometer. The optical frequency sweep using a single laser diode is achieved by generating short current pulses with a high amplitude, which are driving the laser diode. Theoretical analysis showed that the modulation frequency could be changed by the optical path difference of the interferometer or optical frequency sweep rate of a laser diode. This paper presents a method for constant frequency and chirped signal generation using a programmable current pulse waveform. The experimental results showed that the proposed signals could be generated within a microwave (1 - 30 GHz) and THz band (0.1 - 0.3 THz).

1 Uvod

V zadnjih letih se je povpraševanje po visoki nosilni frekvenci, visoki pasovni širini in visokih hitrostih prenosa močno povečalo. Frekvenčni pas mikrovalov in frekvenčni pas THz valov nam ponujata doslej še neraziskane možnosti hitrega prenosa podatkov, sploh frekvenčni pas THz valov (med 0,1 in 10 THz [1]), ki nam, zaradi svojih lastnosti [2], omogoča npr. detekcijo eksploziva, zajem slik z visoko resolucijo in širokopasovne komunikacije. Trenutne tehnologije generiranja in detektiranja THz valov so drage, saj na trgu primanjkuje cenovno dostopnih oddajnikov, detektorjev, valovodov z nizkimi izgubami in linearnih ter širokopasovnih naprav.

Opto-električne metode generiranja in detektiranja THz valov v večini temeljijo na vzbujanju fototoka v kristalih in polprevodniških napravah [3], ki jih imenujemo foto prevodne antene (ang. Photoconductive Antenna, PCA). PCA uporabljamo tako za generiranje, kot tudi za koherentno detektiranje THz valov. Avtorji v [4] so pokazali, da moramo za koherentno detektiranje THz valov PCA oddajnik in PCA detektor osvetliti s svetlobo iz istega svetlobnega vira. Trenutne metode generiranja optičnih signalov, ki jih uporabljamo pri generiranju/detektiranju THz valov s PCA, vključujejo uporabo fs-laserjev, s pomočjo katerih lahko generiramo kratek optični impulz [3], in množenje dveh periodičnih optičnih

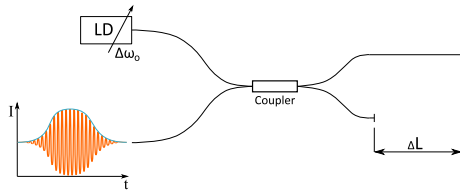
signalov z različno valovno dolžino, ki nam omogoča generiranje periodičnega signala s THz frekvenco [1]. Pri generiranju periodičnih signalov s THz frekvenco uporabljamo laserske diode s porazdeljeno povratno vezavo (ang. Distributed Feedback, DFB), ki jim lahko s temperaturo nastavljamo valovno dolžino generiranega laserskega valovanja. Nastavljanje te valovne dolžine je počasno [5] in zato ni primerno za aplikacije, kjer potrebujemo hitre spremembe.

V tem prispevku je prikazan način hitrega premika optične frekvence laserske svetlobe, ki nam omogoča generiranje optičnih signalov s frekvenco v THz frekvenčnem pasu. Predlagana metoda temelji na hitrem frekvenčnem premiku svetlobe, ki jo generiramo z ozkopasovnim laserskim virom, in neuravnoveženim optičnim vlakenskim interferometrom. Izpeljan je bil teoretični model predlagane metode, ki je pokazal, da je frekvenca generiranega signala odvisna od hitrosti frekvenčnega premika in neuravnoveženosti optičnega interferometra oz. razlike optičnih poti (ang. Optical Path Difference, OPD). OPD lahko nastavimo s spreminjanjem dolžine optičnega vlakna, za kar se uporabljajo piezoelektrični (PZT) kristali [6]. Raztegovanje optičnega vlakna s PZT kristalom ni primerno v predstavljeni metodi, saj lahko spreminimo dolžino vlakna za nekaj milimetrov pri dolžini vlakna nekaj metrov [6]. Avtorji v [7] in [8] predlagajo hitro linearno frekvenčno premaknitev laserske svetlobe z uporabo tokovnega sunka z veliko amplitudo in kratko dolžino. S predlaganim hitrim frekvenčnim premikom lahko frekvenco generiranega signala spreminjamo s frekvenco ponavljanja tokovnih sunkov. Glavna prednost predlaganega generatorja optičnih signalov je sposobnost generiranja kompleksnih oblik signalov. Iz eksperimentalnih rezultatov in teoretičnega modela lahko sklepamo, da lahko generiramo optične signale s frekvenco v mikrovalovnem in THz frekvenčnem pasu.

2 Visoko-frekvenčna optična modulacija

Predlagan optični generator je prikazan na Sliki 1. Sestavljen je iz frekvenčno nastavljivega optičnega vira in neuravnoveženega vlakenskega interferometra. Svetlobna jakost, odbita iz vlakenskega interferometra, je v splošnem definirana z:

$$I_r(t) = \frac{I_0}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{2n\Delta L\omega(t)}{c} \right) \right) \quad (1)$$



Slika 1: Predlagan optični generator, ki uporablja optični vir s frekvenčno premaknitvijo in debalansiran interferometer.

kjer je I_0 svetlobna jakost, n efektivni lomni količnik, ΔL predstavlja OPD, $\omega(t)$ optična krožna frekvenca in c hitrost svetlobe. Če uporabimo optični vir s frekvenčni premikom, postane $\omega(t)$ funkcija časa, fazo kosinusne funkcije v enačbi (1) pa lahko opišemo z:

$$\phi(t) = \frac{2n\Delta L}{c} \left(\omega_0 + \frac{\partial \omega}{\partial t} t \right) \quad (2)$$

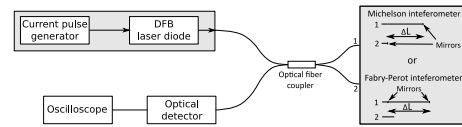
kjer je ω_0 izhodiščna optična krožna frekvenca. Privzamemo, da je hitrost premika optične krožne frekvence konstanta. Optična krožna frekvenca se po času linearno dviguje, odbiti optični signal iz interferometra pa dobi sinusno časovno karakteristiko. Neuravnovešen optični interferometer, ki ga napajamo z optičnim virom z linearno frekvenčno premaknitvijo, bo tako generiral sinusni optični signal, katerega frekvenco lahko določimo z:

$$f = \frac{2n\Delta L}{2\pi c} \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{2}{c} n\Delta L \frac{\partial \nu}{\partial t} \quad (3)$$

kjer je $\partial \nu / \partial t$ hitrost optičnega frekvenčnega premik. Vidimo, da je frekvenca generiranega sinusnega signala enaka produktu hitrosti optične frekvenčne premaknitve in OPD. Poudarimo, da smo pri izbiri teh dveh parametrov omejeni, saj je optična frekvenčna premaknitev vedno omejena z obsegom in hitrostjo v vseh praktičnih virih. Zato je optična frekvenčna premaknitev v praktičnih optičnih virih vedno omejena. Iz zapsanega sledi, da je dolžina optičnega signala vedno omejena, kar pa nam omeji največji možen OPD optičnega interferometra, saj moramo zagotoviti, da se dva optična signala prekrivata v prostoru. Poudarimo, da pri uporabi laserskih virov s počasno optično frekvenčno premaknitvijo potrebujemo izjemno velik OPD, če želimo generirati signale s frekvenco v THz frekvenčnem pasu. Kadar želimo generirati signala s frekvenco v mikrovalovnem frekvenčnem pasu ali THz frekvenčnem pasu, moramo uporabiti laserske vire s hitro frekvenčno premaknitvijo, zaželeno v dolžini nekaj 10 ns, kjer je OPD pod 1 km.

Kadar optično krožno frekvenco iz enačbe (2) v času spreminjamo nelinearno, lahko generiramo zahtevnejše oblike signalov. Če privzamemo, da je hitrost premaknitve optične frekvence $\partial \nu / \partial t$ linearna funkcija, lahko generiramo optični frekvenčni žvižg, ki je definiran kot:

$$f(t) = \frac{2}{c} n\Delta L \frac{\partial \nu}{\partial t}(t) \quad (4)$$



Slika 2: Zgradba predlaganega generatorja optičnih signalov z Michelsonovim in Fabry-Perotovim interferetrom.

3 Generator optičnih signalov s hitro premaknitvijo optične frekvence

Predlagan optični generator je prikazan na Sliki 2. Sestavljen je iz DFB laserske diode in generatorja tokovnih sunkov, ki nam služi za generiranje frekvenčno premaknjene signala, in dveh različnih tipov optičnih vlakenskih interferetromov (Michelsonov in Fabry-Perotov interferometer). Uporaba vlakenskih interferetromov nam omogoča kompaktno in robustno izvedbo signalnega generatorja. Optični signali so bili merjeni z optičnim detektorjem N7004A proizvajalca Keysight in z osciloskopom UXR0334A proizvajalca Keysight.

3.1 Načrtovanje in izdelava neuravnovešenih vlakenskih interferetromov

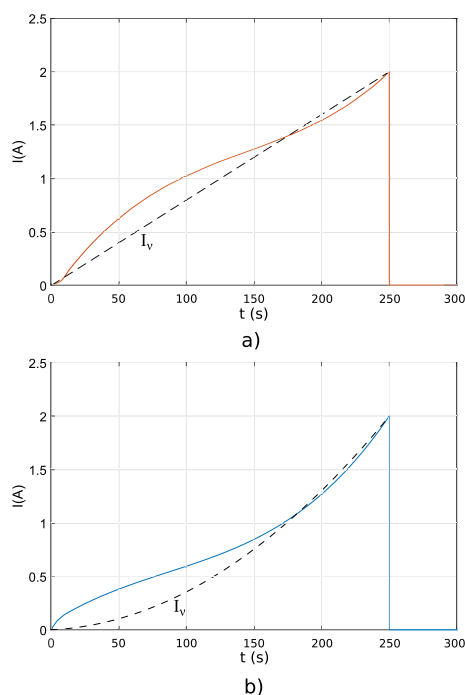
V predlaganem generatorju optičnih signalov sta bila uporabljena dva tipa optičnih vlakenskih interferetromov: (i) Michelsonov in (ii) Fabry-Perotov interferometer. Zrcala v Fabry-Perotovih vlakenskih interferetrih so bila izdelana s tehniko napraševanja visoko-odbojnih materialov (TiO_2), ki so bila nato varjena z ustreznimi programom varjenja optičnih vlaken [9]. Odbojnost zrcal v Fabry-Perotovih interferetrih je dosegla 10 %. Zrcala v Michelsonovih vlakenskih interferetrih so bila izdelana z tehnologijo napraševanja materialov (Al), dosežena pa je bila 30 % odbojnost zrcal. Izdelanih je bilo več interferetromov, ki so bili načrtani s pomočjo enačbe (3) glede na želeno frekvenco generiranega signala pri dolžini tokovnega sunka $T_s = 250$ ns. Dolžine interferetromov so predstavljene v Tabeli 1.

Tabela 1: OPD Michelsonovih in Fabry-Perotovih interfeormetrom ΔL za želeno frekvenco f .

f (GHz)	1	8	15	30	100	200	300
ΔL (m)	0.02	0.16	0.3	0.61	2.03	4.06	6.1

3.2 Generator tokovnih sunkov

Predlagan laserski vir s hitro optično frekvenčno premaknitvijo je zgrajen iz standardne telekomunikacijske DFB laserske diode, ki je tokovno vodena s kratkim tokovnim sunkom visoke amplitude. Tokovno vodenje temelji na metodi, ki so jo avtorji podrobneje opisali v [7]. Metoda uporablja selektivno in hitro gretje aktivnega področja DFB diode, pri čemer z ustrežno valovno obliko tokovnega sunka lahko ustvarimo linearni premik optične frekvence laserskega vira.



Slika 3: Oblika tokovnega sunka: a) linearni premik optične frekvence s $T_s = 250$ ns, b) nelinearni premik optične frekvence s $T_s = 250$ ns.

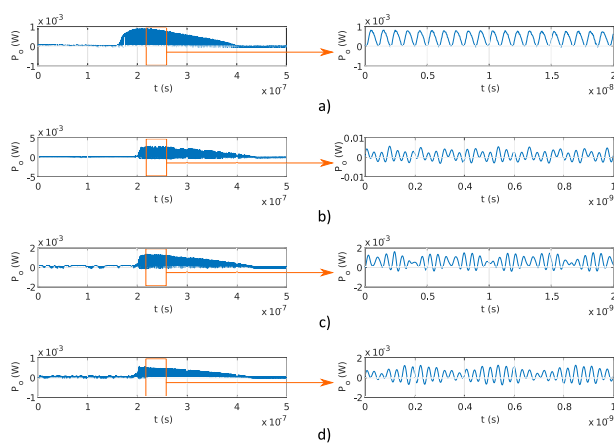
Obliko tokovnega sunka, dolžino sunka in njegovo maksimalno amplitudo so za linearni premik optične frekvence določili avtorji v [8] in je prikazana na Sliki 3 (a). Tokovni sunek lahko določimo kot $I(t) = I_\nu(t) + I_{DFB}(t)$, kjer je I_ν linearna funkcija premika optične frekvence, ki nam pove, da je hitrost spreminjanja optične frekvence konstanta funkcija časa, in $I_{DFB}(t)$ je karakteristična krivulja izbrane DFB laserske diode in je enaka ne glede na obliko signala, ki jo želimo generirati. $I_{DFB}(t)$ je bila eksperimentalno določena v [8]. Če spremenimo I_ν , lahko generiramo različne oblike optičnih signalov. Oblika tokovnega sunka, s pomočjo katere lahko generiramo optični frekvenčni žvižg, je kvadratične oblike, kot je prikazana na Sliki 3 (b).

4 Eksperimentalna evalvacija

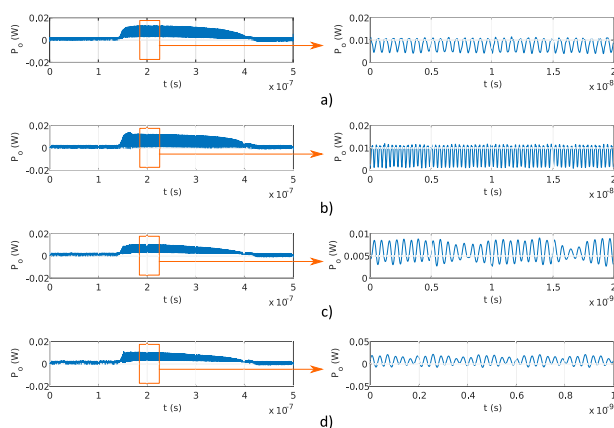
Generator optičnih signalov je bil evalviran v dveh različnih scenarijih. V prvem scenariju je bila uporabljena linearna premaknitev optične frekvence v dolžini tokovnega sunka $T_s = 250$ ns in interferometri obeh tipov z OPD iz Tabele 1. V drugem scenariju sta bila uporabljena Michelsonov interferometer z $\Delta L = 0,033$ m in Fabry-Perotov interferometer z $\Delta L = 0,02$ m ter oblika tokovnega sunka, ki je predstavljena na Sliki 3 (b).

4.1 Generiranje signalov z linearno premaknitvijo optične frekvence

Slika 4 (a)-(d) in Slika 5 (a)-(d) prikazuje generirane optične signale z dolžino tokovnega sunka $T_s = 250$ ns pri uporabi Michelsonovih in Fabry-Perotovih interferetrov z OPD iz Tabele 1, kjer je zelena frekvenca manjša ali enaka 30 GHz. Generiranim optičnim pulzom ob začetku



Slika 4: S Fabry-Perotovim interferetrom generirani signal z OPD ΔL iz Tabele 1: (a) 1 GHz, (b) 8 GHz, (c) 15 GHz, (d) 30 GHz.

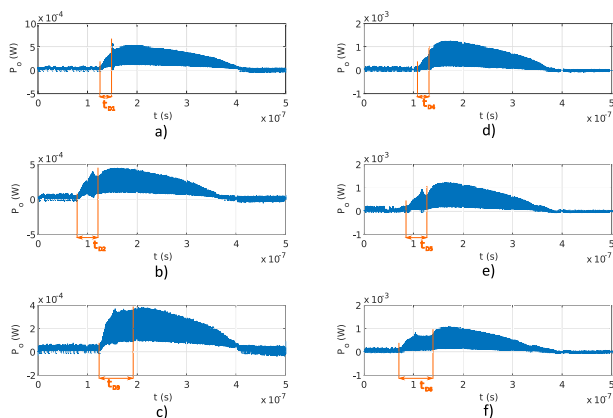


Slika 5: Z Michelsonovim interferetrom generirani signal z OPD ΔL iz Tabele 1: (a) 1 GHz, (b) 8 GHz, (c) 15 GHz, (d) 30 GHz.

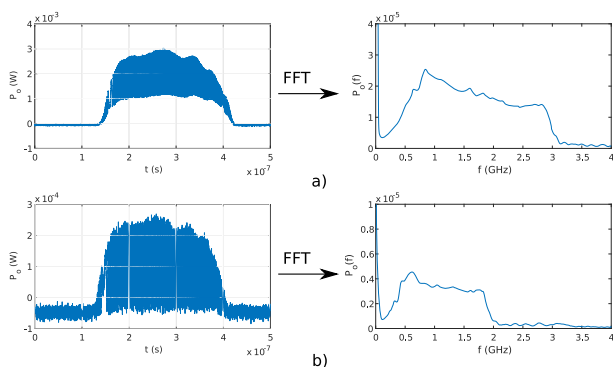
pulza amplituda hitro naraste, nato pa zaradi naraščanje temperature v aktivnem področju DFB laserske diode pride do zmanjšanja emisije fotonov. Moč optičnega signala zato začne padati in pade na vrednost 0 ob koncu tokovnega sunka pri času T_s . Iz signalov, pri katerih je pričakovana frekvenca pod 30 GHz lahko frekvence generiranih signalov razberemo iz Slike 4 (a)-(d) in Slike 5 (a)-(d) ter jih prikažemo v Tabeli 2. Frekvenca generiranega signala je stabilna, odstopa pa od želene vrednosti zaradi razlike med ocenjenim OPD in med praktično implementacijo interferetrov. Iz Slike 6 (a)-(f) lahko razberemo zakasnitve t_d , ki so posledica večjega OPD. OPD je pri zelenih frekvencah nad 100 GHz v Tabeli 1 še dovolj majhen, da v interferetrovih pride do prekrivanja

Tabela 2: Izmerjene frekvence f_M and f_{FP} pri uporabi Michelsonovega in Fabry-Perotovega interferetrov z OPD iz Tabele 1.

f (GHz)	f_M (GHz)	f_{FP} (GHz)
1	1.6	1.02
8	6.25	7.9
15	16.3	15.3
30	29.2	31.1



Slika 6: Generirni optični signali z OPD interferometrov ΔL iz Tabele 1: (a) Fabry-Perotov interferometer, $f = 0.1$ THz (b) Fabry-Perotov interferometer, $f = 0.2$ THz, (c) Fabry-Perotov interferometer, $f = 0.3$ THz (d) Michelsonov interferometer, $f = 0.1$ THz (e) Michelsonov interferometer, $f = 0.2$ THz, (f) Michelsonov interferometer, $f = 0.3$ THz.



Slika 7: Generiran optični frekvenčni žvižg in pripadajoči spekter: (a) Michelsonov interferometer z $\Delta L = 0,033$ m, (b) Fabry-Perotov interferometer z $\Delta L = 0,02$ m.

odbitih signalov. Zaradi omejitve merilne opreme lahko z opremo, ki nam je na voljo, detektiramo samo ovojnico generiranega signala.

4.2 Generiranje signalov z nelinearno premaknitvijo optične frekvence

Slika 7 (a)-(b) prikazuje generiran optični frekvenčni žvižg. Generiran je bil s pomočjo tokovnega sunka, ki je prikazanega na Sliki 3 (b). Uporabljena sta bila Michelsonov interferometer z OPD $\Delta L = 0,033$ m in Fabry-Perotov interferometer z OPD $\Delta L = 0,02$ m. Iz spektra generiranih signalov lahko določimo generirane frekvence, in sicer 1 GHz do 3 GHz za Michelsonov interferometer in 0,5 GHz do 2 GHz za Fabry-Perotov interferometer. Ker s segrevanjem aktivnega področja DFB diode optična moč pada, padajo tudi amplitude generiranih frekvenc, saj so višje frekvence generirane proti koncu dolžine tokovnega sunka T_s .

5 Sklep

V članku je predstavljena metoda generiranja frekvenčno moduliranega optičnega signala, s pomočjo katerega lahko

generiramo optične signale s frekvenco v THz frekvenčnem pasu. Generator optičnih signalov je sestavljen iz DFB laserske diode in generatorja tokovnih sunkov, s pomočjo katerega lahko izvedemo linearno in nelinearno premaknitev optične frekvence laserskega sevanja. Predlagani generator optičnih signalov je bil eksperimentalno evalviran. V prvem eksperimentu je bil uporabljen tokovni sunek, s pomočjo katerega smo izvedli linearno premaknitev optične frekvence. Kot rezultat so bili generirani optični signali s sinusno karakteristiko. Merjeni signali so bili v skladu s teoretičnim modelom. V drugem eksperimentu je bil generiran optični frekvenčni žvižg s pomočjo tokovnega sunka, ki omogoča linearno spreminjanje hitrosti premika optične frekvence. S pomočjo obeh eksperimentov je bilo pokazano, da lahko s predlaganim generatorjem optičnih signalov generiramo tako signale s konstantno frekvenco, kot tudi bolj kompleksne oblike signalov (frekvenčni žvižg), generirani optični signali pa so primerni za generiranje in detektiranje THz valov z uporabo PCA. V nadaljnjem delu je smiselno raziskati možnosti nastavljanja generirane frekvence s spremembo oblike toka, saj je spreminjanje OPD nepraktično.

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

Literatura

- [1] Safian, R.; Ghazi, G.; Mohammadian, N. Review of photomixing continuous-wave terahertz systems and current application trends in terahertz domain. *Opt. Eng.* 2019, 58, 1. doi:10.1117/1.oe.58.11.110901.
- [2] Naftaly, M.; Vieweg, N.; Deninger, A. Industrial applications of terahertz sensing: State of play. *Sensors (Switzerland)* 2019, 19.
- [3] Yun-Shik Lee. *Principles of Terahertz Science and Technology*; Springer US, 2009. doi:10.1007/978-0-387-09540-0.
- [4] Saeedkia, D. Terahertz photoconductive antennas: Principles and applications. *Proc. 5th Eur. Conf. Antennas Propagation, EUCAP 2011* 2011, pp. 3326–3328.
- [5] Guo, R.; Lu, J.; Liu, S.; Shi, Y.; Zhou, Y.; Chen, Y.; Luan, J.; Chen, X. Multisection DFB Tunable Laser Based on REC Technique and Tuning by Injection Current. *IEEE Photonics J.* 2016, 8, 1–7. doi:10.1109/JPHOT.2016.2585923.
- [6] Henderson, D.A.; Hoffman, C.; Culhane, R.; Viggiano III, D. Kilohertz scanning all-fiber optical delay line using piezoelectric actuation. *Fiber Opt. Sens. Technol. Appl. III* 2004, 5589, 99.
- [7] Njegovec, M.; Donlagic, D. Rapid and broad wavelength sweeping of standard telecommunication distributed feedback laser diode. *Opt. Lett.* 2013, 38, 1999. doi:10.1364/ol.38.001999.
- [8] Njegovec, M.; Donlagic, D. Interrogation of FBGs and FBGs Arrays Using Standard Telecom DFB Diode. *J.Light. Technol.* 2016, 34, 5340–5348.
- [9] Bendoula, R.; Wacogne, B.; Pieralli, C.; Gharbi, T. Fabrication of an intrinsic fiber Fabry-Perot interferometer involving simple in situ control of multilayer TiO₂-SiO₂ mirrors: Material properties studies and cavity interrogation procedure. *Optical Engineering - OPT ENG* 2005, 44. doi:10.1117/1.2049273.