

Stabilizacija delovne točke Mach–Zenderjevega modulatorja

Maja Atanasovska, Vesna Eržen, Luka Bogataj, Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: taatanasovska@gmail.com, bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

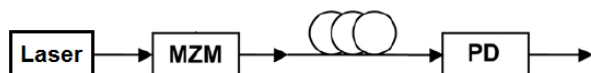
Stabilization of a Mach-Zehnder modulator's operating point

The electro-optical Mach-Zehnder modulator (MZM) has been widely used for high-speed digital optical fiber communications systems, since it has a large modulation bandwidth and a low driving voltage. Due to the environmental temperature changes to which the MZM is exposed, it is important to establish an appropriate modulation operating point. In this paper we present comparisons between different systems for controlling the optimum modulation operating point, with a focus on a system for optimizing the modulation point with a microcontroller.

1 Uvod

Pri optičnih komunikacijskih oddajnikih ločimo med direktno in zunanjo modulacijo svetlobnega vira. Ta klasifikacija je glede na točko, kjer se vrši modulacija električnega signala na optični nosilec. Zunanja modulacija je primerna predvsem za prenos informacij v visoko zmogljivih optičnih zvezah z višjimi bitnimi hitrostmi. Kot zunanji modulator se najpogosteje uporablja elektro-optični Mach-Zenderjev modulator (MZM). [1]

Optična povezava z zunanjo amplitudno modulacijo, kot je prikazana na sliki 1, je sestavljena iz polprevodniškega laserja, ki oddaja nemoduliran svetlobni signal. Le-ta se s pomočjo podatkovnega (električnega) signala modulira v zunanjem Mach-Zenderjevem modulatorju. Tak signal potuje do optičnega sprejemnika oziroma fotodetektorja, kjer poteka demodulacija signala.



Slika 1. Optična zveza z zunanjo amplitudno modulacijo.

Stabilnost delovne točke MZM je pomembna z vidika kvalitete prenosa signala. Za optimalen prenos podatkov v optičnih zvezah mora biti delovna točka ves čas vzdrževana v optimalnem področju delovanja MZM, ki se nahaja na linearnem delu prenosne karakteristike MZM. Na položaj delovne točke MZM najbolj vplivajo temperatura samega modulatorja, valovna dolžina laserskega vira in polarizacija vstopne svetlobe. S spremembo temperature se spreminjajo dimenzije posameznih optičnih poti znotraj modulatorja. To se še najbolj odraža v primeru, kadar sta laserski vir

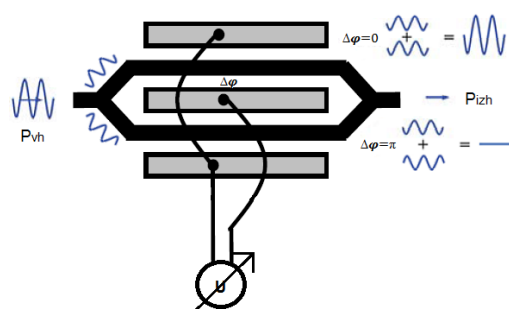
in MZM v istem ohišju. Če laserju spreminjamo temperaturo z namenom nastavljanja valovne dolžine, temperaturna sprememba posredno vpliva na dolžino optičnih poti znotraj MZM, kar povzroča premik delovne točke. Spreminjanje delovne točke MZM med delovanjem optične zveze popači prenašani optični signal. [1]

Za namen optimalnega delovanja elektro-optičnega MZM se uporabljajo različni sistemi za nadzor in stabilizacijo delovne točke. Najpogosteje se uporabljajo sistemi z dodanim nizkofrekvenčnim električnim modulacijskim signalom in popraviljanjem delovne točke s pomočjo povratne zanke [2], [3]. Obstajajo tudi sistemi, ki delujejo na podlagi neposrednega opazovanja drugega harmonika v izhodnem moduliranem signalu in predhodno spravljenih vrednosti [1]. V tem članku je opisana in predlagana stabilizacija delovne točke MZM s pomočjo opazovanja vhodne in izhodne optične moči ter izvedba krmiljenja s pomočjo mikrokontrolerja.

2 Delovanje MZM

Elektro-optični MZM vsebuje interferometer iz elektro-optičnega materiala, kjer je lomni količnik snovi odvisen od električnega polja. Za izdelavo svetlovodov v MZM se najpogosteje uporabljajo litijev niobat – LiNbO_3 (LN) [5], galijev arzenid (GaAs) ali indijev fosfid (InP).

Amplitudna modulacija v MZM poteka tako, da se svetlobni signal ob vходу v Mach-Zenderjev interferometer razdeli v dve veji, ki predstavljata enorodovna planarna valovoda v obliki ležeče črke Y. V vsaki od optičnih vej prihaja do fazne modulacije preko spremembe lomnega količnika. Amplitudno modulacijo vhodnega optičnega vala, ki je posledica interference izstopnih valov v Y sklopniku, prikazuje slika 2.



Slika 2. Princip amplitudne modulacije v MZI.

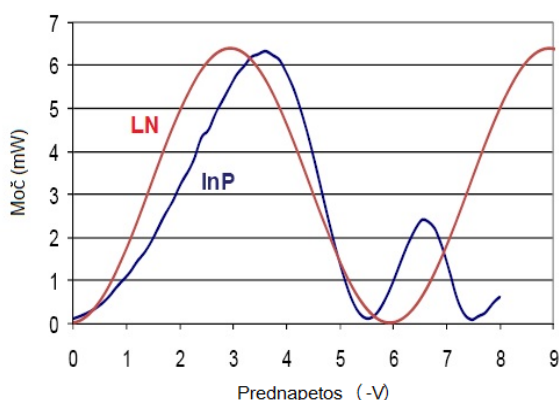
Za optimalno amplitudno modulacijo izkoriščamo Mach-Zenderjev interferometrični pojav [4]. Nastala fazna razlika ($\Delta\varphi$) na izhodu iz interferometra je odvisna od jakosti modulacijskega signala in

karacteristične napetosti modulatorja. V primeru, ko je fazna razlika na izhodu enaka nič, signala konstruktivno interferirata. Kadar imamo na izhodu neko fazno razliko pa se interferenca poslabša. Fazna razlika π predstavlja skrajno destruktivno interferenco. Delovna točka MZM v tem primeru je na vrhu močnostne prenosne karakteristike oziroma v najbolj neprimernem položaju.

V elektro-optičnem valovodu je mogoče z zunanjim električnem poljem vplivati na fazo optičnega signala. Električno polje je določeno z modulacijskim RF signalom. Ko se optična signala ponovno združita je skupna optična moč (P_{izh}) odvisna od medsebojne faze obeh prispevkov, kot je prikazano z enačbo 1.

$$P_{izh} = \frac{1}{2} P_{izh} (1 + \cos(\Delta\phi)) \quad (1)$$

Sprememba faze optičnega signala je zelo odvisna tudi od materiala, iz katerega je modulator izdelan. To vpliva na prenosno karakteristiko in učinkovitost modulacije. Pri LN MZM je sprememba faze linearna, medtem ko je pri InP nelinearna glede na jakost danega električnega polja. Močnostna prenosna karakteristika za InP in LN MZM je prikazana na sliki 3.



Slika 3. Močnostna prenosna karakteristika za LN in InP MZM. [1]

Optimalen položaj delovne točke MZM je na odseku prenosne karakteristike, kjer je le-ta najbolj linearna. Linearni del se nahaja na prehodu med maksimumom in minimumom odziva.

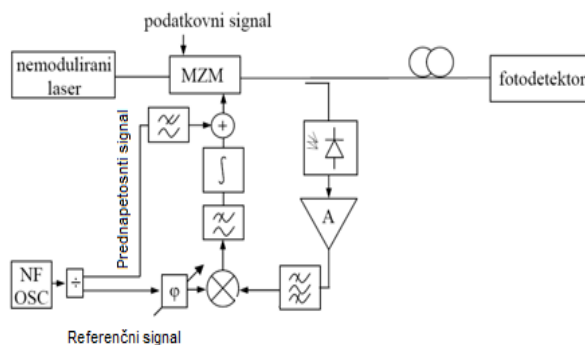
Temperaturna sprememba MZM vpliva na spremembo položaja delovne točke. S primerno prednapetostjo najlažje uravnavamo položaj delovne točke. V nadaljevanju prispevka bodo opisane štiri različne metode za izvedbo stabilizacije delovne točke

3 Stabilizacija delovne točke z dodanim nizkofrekvenčnim signalom

Sistem za stabilizacijo delovne točke MZM z dodanim nizkofrekvenčnim signalom je izveden s pomočjo povratne zanke in z dodatnim referenčnim nizkofrekvenčnim signalom, kot je prikazano na sliki 4 [1]. S povratno zanko kontroliramo enosmerno napetost MZM in s tem tudi zmanjšujemo drugo harmonsko komponento, ki se pojavlja v signalu.

Sam proces stabilizacije je izveden tako, da iz signala, ki ga dobimo iz nizkofrekvenčnega oscilatorja,

s pomočjo delilnika, generiramo dva signala, in sicer prednapetostni modulacijski signal in referenčni signal. Prednapetostni signal vodimo na vходу MZM preko nizkoprepustnega sita in s tem tudi moduliramo svetlobni nosilec. Podatkovni signal vstopa na visokofrekvenčni vhid MZM, medtem ko prednapetostni nizkofrekvenčni signal vstopa na prednapetostni vhid MZM.



Slika 4. Blokovna shema sistema za nadzor in stabilizacijo delovne točke z dodanim nizkofrekvenčnim signalom

Ko se referenčni signal in ojačan signal iz detektorske foto diode množita, nastaneta enosmerna in druga harmonska komponenta. S pomočjo nizkopasovnega sita se izloči druga harmonska komponenta, enosmerno komponento pa predstavlja signal napake. Signal napake se vodi naprej za integratoru, ki nastalo napako odpravi. Integrator vzdržuje sistem v vnaprej določeni delovni točki s spreminjanjem prednapetosti tako dolgo, dokler ne dobimo vrednost nič za signal napake.

4 Stabilizacija delovne točke z direktnim opazovanjem druge harmonske komponente

Sistem za stabilizacijo delovne točke MZM z direktnim opazovanjem druge harmonske komponente deluje na podoben način kot predhodno opisan sistem z dodanim nizkofrekvenčnim signalom z razliko, da se namesto nizkofrekvenčnega signala uporablja že obstoječ visokofrekvenčni informacijski signal oziroma njegov drugi harmonik.

Optični signal s povratkom na ničlo (ang. Return-to-Zero – RZ), ki izhaja iz MZM se vodi direktno na fotodiodo, katera s pomočjo detekcije generira visokofrekvenčni signal. Detektiran visokofrekvenčni signal poleg osnovne komponente vsebuje tudi drugo harmonsko komponento, ki jo izloči sistem za nadzor delovne točke. Izločena druga harmonska komponenta se nadalje vodi v harmonski mešalnik, katerega naloga je preslikava visokofrekvenčnega signala v področje nižjih frekvenc. S tem je nadaljnja obdelava krmilnega signala preprostejša. Preslikan signal se, podobno kot v prejšnjem primeru, vodi v integrator, v katerem se s spreminjanjem prednapetosti odpravlja napako, dokler MZM ne doseže želene delovne točke.

Slabost te metode je potreba po sinhronizaciji med generatorjem signala in podatkovnim signalom ter

dejstvo, da je potrebno pred mešanjem obeh signalov prilagoditi fazo mešalnih signalov.

5 Stabilizacija s pomočjo predhodno izmerjenih vrednosti druge harmonske komponente

Delovno točko MZM je mogoče stabilizirati tudi s pomočjo predhodno izmerjenih vrednosti drugega harmonika in njihove kasnejše uporabe od realnem delovanju.

Sam postopek poteka na način, da pri fiksni prednapetosti izmerimo visokofrekvenčno moč osnove in druge harmonske komponente s spreminjajočo se temperaturo laserja. Iz opravljenih meritev lahko določimo, pri kateri temperaturi ima MZM najprimernejšo točko delovanja. To izkoristimo, da bi nastavili temperaturo laserja in si zagotovili, da je delovna točka vedno v linearnem delu istočasno pa se s tem izognemo drugi harmonski komponenti, ki kvarno vpliva na prenašani signal.

Ker se moč osnovne in druge harmonske komponente spreminjata s spreminjanjem temperature laserja, lahko določimo temperaturo laserja, v kateri bo MZM imel najprimernejšo točko delovanja.

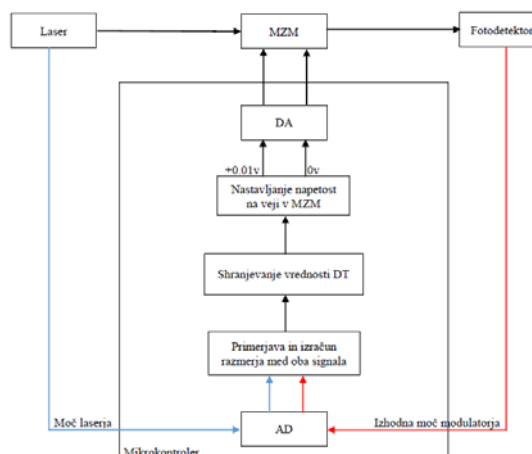
6 Stabilizacija delovne točke s pomočjo opazovanja vhodne in izhodne optične moči

Delovanje tovrstnega sistema za nadzor delovne točke temelji na primerjavi moči laserske svetlobe z izhodno močjo modulatorja. To funkcijo opravlja mikromilna enota z dvema vhodoma, pri čemer na en vhod prihaja signal iz laserja, ki je predhodno določen in v celotnem času delovanja sistema ostaja nespremenjen. Na drugi vhod mikrokrmilne enote pa vodimo signal iz modulatorja, katerega nivo se spreminja glede na spreminjanje napetosti v MZM. Jakost signala iz laserja se pojavi direktno na monitorski fotodiodi laserskega modula. Za odčitavanje jakosti izhodnega optičnega signala, pa je potrebno le-tega predhodno detektirati s pomočjo fotodetektorja.

Oba vhodna signala se s pomočjo analogno-digitalnega (AD) pretvornika pretvorita v digitalno obliko, primerno za nadaljnje procesiranje, ki se nanaša na izračun moči obeh signalov in njuno medsebojno primerjavo, ter izračun njunega medsebojnega razmerja. Zaradi zakasnitve signala na izhodu iz MZM, do katere pride v sistemu s povratno optično zanko, pred primerjavo karakteristik, signala ustrezno obdelamo. Obdelava poleg dodajanja ustrezne zakasnitve vsebuje tudi vzorčenje ter povprečenje obeh signalov, da bi se izognili morebitnim napakam zaradi šuma. Povprečenje izvajamo s pomočjo poljubnega števila vzorcev (v našem primeru 100 vzorcev v 125 ms).

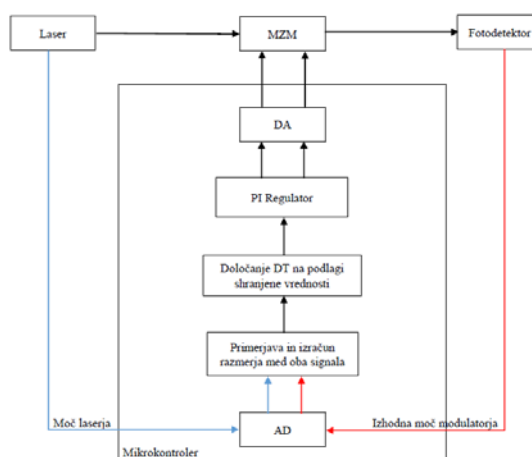
Delovanje samega sistema poteka v dveh delih, ki sta prikazana na slikah 5 in 6. Oba dela sta medsebojno tesno povezana. V prvem delu, ki ga prikazuje slika 5, mikrokrmilnik dobi izhodni močnostni signal iz modulatorja, njegovo vrednost shrani ter izračuna

razmerje med obema močema. Potem se postopoma viša napetost na eni od veji v MZM (v našem primeru +0,01 V, na vsaki 100 vzorcev). Na drugi veji imamo nastavljeno napetost nič, zato da dobimo bolj natančne rezultate. Celotni postopek se ponavlja toliko časa, dokler sistem ne pridobi celotne močnostne karakteristike in njene spremembe glede na napetostno spreminjanje znotraj MZM. Ker se signal na izhodu MZM spreminja s spreminjanjem napetosti znotraj MZM, se pri vsaki spremembi vrednost shrani in izračuna razmerje med signaloma. Iz shranjene vrednosti se izriše karakteristika in iz nje določi optimalna delovna točka MZM.



Slika 5. Blokovna shema sistema za določanje delovne točke s pomočjo opazovanja vhodne in izhodne optične moči.

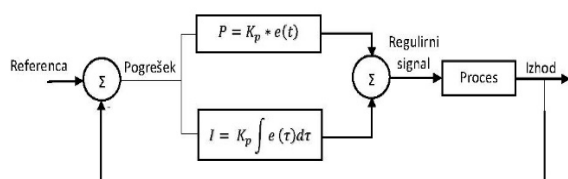
V drugem delu, ki je prikazan na sliki 6, mikrokrmilnik nastavi želeno DT in s pomočjo proporcionalno-integrirnega (PI) regulatorja popravi morebitna odstopanja in zagotavlja prednapetost, ki vzdržuje delovno točko MZM v optimalnem področju delovanja.



Slika 6. Blokovna shema sistema za stabilizacijo delovne točke s pomočjo PI regulatorja.

PI regulator, ki je prikazan na sliki 7, je sestavljen iz dveh delov, proporcionalnega (P) in integracijskega (I). P del se odziva na trenutno vrednost napake; v praksi nikoli ne doseže vrednosti nič. I del pa sešteva napake in poskuša spraviti napako na nič. Na vhod PI

regulatorja je potrebno pripeljati dva signala – referenčno (želeno) in trenutno vrednost signala. Po tem ko se obe vrednosti med seboj odštejeta, ostane razlika, ki predstavlja odstopanje trenutnega signala od zelene vrednosti.



Slika 7. Blokovna shema PI regulatorja

Da dobimo izhodni signal, moramo najprej izračunati P in I člena. P člen je proporcionalen trenutni vrednosti napake krat faktor K_p , I člen je integral ali seštevek vseh prejšnjih napak, pomnoženih s faktorjem K_i [5]. Izhodno vrednost iz I člena določimo tako, da prejšnjo vrednost I(t-1) člena seštejemo s trenutno vrednostjo napake in pomnožimo z faktorjem K_i .

Izhod iz regulatorja je seštevek P in I, v našem sistemu je to vrednost, ki jo mora sistem nastaviti, da bi dosegel želeno delovno točko. Izhodno vrednost iz mikrokrmilne enote je potrebno z digitalno-analogo (DA) pretvoriti v ustrezne analogne enote.

Kadar je sistem postavljen v optimalno DT, se razmerje med obema signaloma uporablja za preverjanje sprememb v sistemu. Če je razmerje enako razmerju iz zelene DT, sistem deluje normalno. V primeru, kadar razmerje ni enako, pomeni, da je prišlo do spremembe v samem sistemu in se še enkrat ponovi celotni postopek od začetka.

7 Zaključek

Pri načrtovanju optičnih zvez z zunanjim modulatorjem je ena od ključnih potreb stabilizacija delovne točke MZM za daljše obdobje. Težave se pojavijo, ker se je pri MZM tehnološko nemogoče izogniti temperaturni in polarizacijski odvisnosti ter pojavom nelinearnosti.

Polarizacijski odvisnosti se izognemo z neposredno montažo laserskega vira na modulator. Temperaturno stabilizacijo lahko dosežemo so neposredno kontrolo temperature okolice. V primerih kadar imamo v istem ohišju laser in modulator, neposredna kontrola temperature ni mogoča, ker se s pomočjo spreminjanja temperature za nastavljanje valovne dolžine laserja spreminja tudi delovna točka MZM. V takih primerih je potrebno posledice spremembe temperature reševati s pomočjo spreminjanja delovne točke. To omogočajo sistemi za stabilizacijo s pomočjo dodanega nizkofrekvenčnega signala, sistem za stabilizacijo in regulacijo na osnovi poznavanja druge harmonske komponente, sistem za stabilizacijo na osnovi izmerjenih vrednostih drugega harmonika ter sistem za stabilizacijo s pomočjo mikrokrmilnika.

Sistem za stabilizacijo delovne točke na osnovi nizkofrekvenčnega podnosilca se najpogosteje uporablja v praksi. Težava pri tem sistemu je, da se signal, ki je dodan za regulacijo zanke prenaša tudi po optičnem

vlaknu in v končnem sprejemniku lahko povzroči nezaželene motnje. Pri sistemu za stabilizacijo delovne točke s pomočjo opazovanja drugega harmonika ni takih problemov. Problem pa predstavlja visoka cena visokofrekvenčnih komponent, saj mora za detektiranje drugega harmonika fotodioda imeti enkrat večjo pasovno širino od osnovnega signala. Slabost sistema za regulacijo delovne točke s pomočjo predhodno izmerjenih vrednosti drugega harmonika zahteva dodatne meritve, ki morajo biti opravljene pred zagonom sistema.

Novo predlagani sistem za stabilizacijo MZM na osnovi opazovanja vhodne in izhodne optične moči odlikuje enostavnost pri implementaciji s pomočjo mikrokrmilnika. Predlagana rešitev je enostavnejša od predhodno opisanih sistemov, saj se sistem sam sproti odloča za najprimernejšo delovno točko. Ko se enkrat postavi v želeno delovno točko, jo sistem vzdržuje s pomočjo primerjanja vhodnega in izhodnega signala iz povratne zanke. Novo predlagani sistem za stabilizacijo MZM za opazovanja vhodne optične moči izkorišča fotodiodo v laserju. Za opazovanje izhodne optične moči pa zadostuje fotodioda z nizko pasovno širino, saj je dovolj informacija o povprečni moči optičnega signala.

Zahvala

Delo je delno financirala Evropska unija iz Evropskega socialnega sklada. Projekt "Večjedna optična vlakna" se izvaja v okviru programa "Po kreativni poti do praktičnega znanja", Operativni program razvoja človeških virov za obdobje 2007-2013, 1. razvojna prioriteta: "Spodbujanje podjetništva in prilagodljivosti" ter prednostne usmeritve 1.3 "Štipendijske sheme", v okviru potrjene operacije "Po kreativni poti do praktičnega znanja".

Literatura

- [1] V. Koderman, B. Batagelj, J. Tratnik, P. Lemunt, L. Naglic, T. Korošec, L. Pavlovič, L. Stanič, M. Vidmar. Sistem za nadzor najprimernejše delovne točke Mach-Zehnderjevega modulatorja. Zbornik devetnajste mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2010, Portorož, Slovenija, 20.-22. september 2010, Portorož, Slovenija.
- [2] A.H.Gnauck, et al.: Comparison of direct and external modulation for CATV lightwave transmission at 1.5 μ m wavelength, Electronics Letters, vol.28, no.20, pp.1875-1876, 24 Sept. 1992
- [3] Marijan Rupnik: Sistem za nadzor delovne točke Mach-Zehnderjevega modulatorja, diplomsko delo, 2002, Ljubljana.
- [4] P.Hariharan, 'Basics of interferometry', Academic Press, Inc 1992
- [5] E.L. Wooten, et al.: A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems, IEEE JSTQE, vol.6, no.1, pp.69-82, 2000.
- [6] en.wikipedia.org/wiki/PID_controller