

Interferometar kao pretvornik relativnog pomaka njihala seizmometra

Ivica Sović

Geofizički zavod »Andrija Mohorovičić«, Prirodoslovno-matematički fakultet
Sveučilište u Zagrebu

Primljeno 27. svibnja 1993, u konačnom obliku 27. prosinca 1993.

Konstruiran je i napravljen prototip malog kompaktnog Michelsonovog interferometra pomoću kojeg su mjereni pomaci njihala seizmometra S-13 Teledyne Geotech. Njihalo seizmometra je pobuđivano na titranje sinusoidalnim signalom frekvencija 0.5, 1 i 2 Hz jednakih amplituda, slučajno generiranim signalom i dodirrom. Oscilacije su istovremeno bilježene digitalnim seizmografom PDAS-100, te su uspoređeni zapisi interferometra i integrala brzine registrirane pomoću PDAS-100. Izrada i ugađanje interferometra je pojednostavljeno korištenjem kockastog djelitelja snopa na čiju je stranicu napareno zrcalo referentnog kraka. Izvor zračenja je temperaturno i strujno stabilizirana laserska dioda TOLD 9200, kolimiranog snopa, valne duljine 670 nm. Razlučivost interferometra je 335 nm. Pomake pruga interferencije broji 16-bitno CMOS brojalo, a njegovo stanje očitava računalo Atari ST 1040 frekvencijom uzorkovanja 33.4 Hz. Dinamički raspon pretvornika je 96 dB, te se njime mogu bilježiti potresi u rasponu magnituda od 1.1 do 5.2 za epicentralnu udaljenost od 0.1°. Pretvornik bi mogao naći primjenu u seizmografu za mjerenje pomaka velikih amplituda.

Interferometer as seismometer displacement transducer

Displacements of the pendulum of S-13 Teledyne Geotech seismometer were measured using a small Michelson interferometer. The oscillations of the pendulum were simultaneously recorded by the PDAS-100 digital seismograph. These records were integrated and compared with those made by the interferometer. The pendulum was stimulated by sine (0.5, 1 and 2 Hz) and random signals. Michelson interferometer was simplified by using the cube beamsplitter with mirror film deposited onto one of its faces. The source of radiation was thermally stabilised collimated laser diode (LD) driven with constant current. Wavelength of LD was 670 nm. Fringes were counted with 16-bit presetable up/down CMOS counter. Counter state was sampled by Atari ST 1040 computer with sampling frequency equal to 33.4 Hz. Resolution of the transducer was 335 nm. The transducer would be able to record oscillations of the pendulum caused by an earthquake with magnitudes between 1.1 and 5.2 at epicentral distance of 0.1°, and could therefore find the application in a displacement strong-motion seismograph.

1. Uvod

U seizmologiji su se interferometri koristili uglavnom za kalibraciju strainmetara i kao njihovi pretvornici pomaka. Budući da strainmetri mjere relativne pomake dvaju točaka udaljenih od nekoliko metara pa do nekoliko desetaka metara, i interferometri koji na njima rade moraju biti velikih dimenzija. Registratori takvih interferometara su prilagođeni dugoperiodičkim oscilacijama.

Do sada još nije bilo pokušaja da se pomaci njihala seizmometra mjere interferometrom. Najvjerojatniji razlozi tome su veličina interferometra i izvora zračenja (najčešće helij-neon lasera), grijanje lasera što je loše za mehaniku seizmometra i teško ugađanje uređaja. Zato je napravljen mali kompaktni Michelsonov interferometar čiji je referentni krak ugođen pri izradi. Izvor zračenja je laserska dioda koja se slabije grije od He-Ne lasera, a osim toga je i temperaturno stabilizirana te ne mijenja uvjete rada mehanike seizmometra.

Michelsonov interferometar radi, kao pretvornik relativnog pomaka, na najjednostavniji mogući način: direktno uspoređujući pomak s referentnom duljinom. Referentna duljina je polovica valne duljine elektromagnetskog vala čija se interferencija promatra, i može se izmjeriti točno do na 10^{-11} m. Zato je i točnost pretvornika vrlo velika. Pretvornik nije frekvencijski selektivan i vrlo je malen, te može raditi na prenosivim seizmometrima.

Pretvornik radi tako da broji pruge interferencije koje prođu preko detektora i određuje im smjer pomaka. Budući da mu je izlazna veličina 16-bitni binarni zapis broja prolazaka pruga, a izlazni naponi su 0 i +5V, može se direktno priključiti na računalo bez A/D pretvorbe ili prilagodbe napona. Dakako, potrebno je koristiti odgovarajući međusklop preko kojeg računalo može pročitati 16-bitnu riječ i upravljati pretvornikom. Za razliku od nekih drugih pretvornika pomaka koji se rabe u seizmometrima, interferometarski pretvornik ne može uzrokovati neželjene oscilacije njihala (Wieland, 1983). Osim toga, nije osjetljiv na promjene elektromagnetskog polja u svojoj blizini.

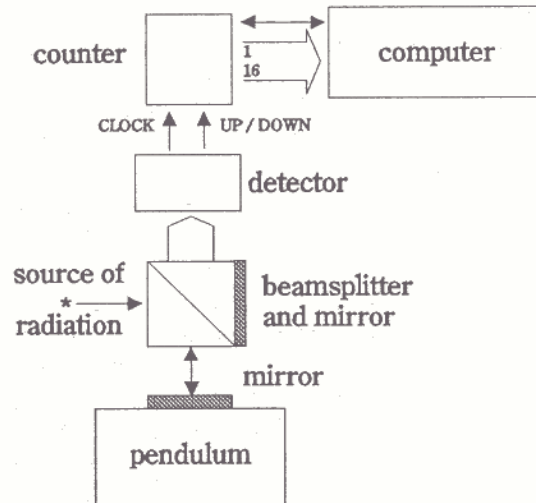
2. Instrument

Interferometarski pretvornik se sastoji od pet osnovnih dijelova: interferometra, izvora zračenja, detektora, brojala i postolja. Pretvornik je shematski prikazan na slici 1.

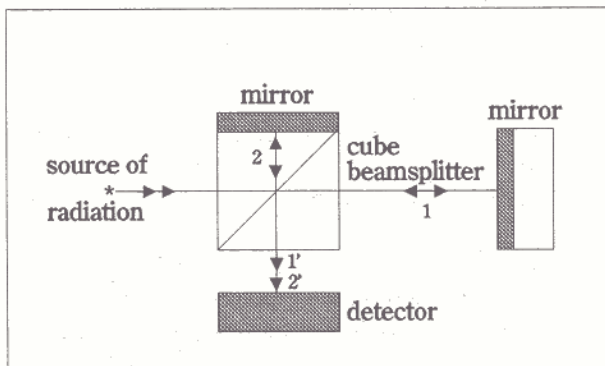
Interferometar – Interferometar koji se rabi kao pretvornik pomaka je Michelsonov interferometar pojednostavljene konstrukcije. Pojednostavljen je tako da je, umjesto polupropusnog ravnog zrcala korišten kockasti djelitelj snopa. Na taj način je postala nepotrebna kompenzacijska pločica koja se rabi u izvornoj verziji uređaja. Osim toga, zrcalo referentnog kraka napareno je na jednu od ploha djelitelja, tako da se referentno zrcalo ne treba naknadno

Slika 1. Shematski prikaz seizmografa s interferometarskim pretvornikom relativnog pomaka.

Figure 1. Seismograph with the Michelson interferometer as displacement transducer.



ugađati (slika 2). Ovakvim pojednostavljenjem interferometra svele su se njegove dimenzije na kocku $1 \times 1 \times 1$ cm, a otpala su i mukotrpa ugađanja. No, osim dobrih strana, pojednostavljenje ima i jednu lošu: zbog razlike duljina referentnog i mjernog kraka koja nikada ne može biti nula, vidljivost slike interferencije je umanjena. S približavanjem mjernog zrcala djelitelju snopa slika interferencije postaje vidljivija, dok sa udaljavanjem zrcala slika blijedi i nestaje kada je mjerno zrcalo udaljeno za duljinu koherencije od djelitelja snopa. Taj se nedostatak mora ispraviti korištenjem izvora zračenja duljine koherencije barem dvostruko veće od najvećeg pomaka mjernog zrcala, što je utvrđeno pokusom. Vidljivost interferencijske slike bi se mogla povećati fiksiranjem referentnog zrcala na nekoj udaljenosti od djelitelja snopa, tako da razlike duljina referentnog i mjernog kraka, u trenutku kada mjerno zrcalo



Slika 2. Michelsonov interferometar s kockastim djeliteljem snopa.

Figure 2. Michelson interferometer with cube beamsplitter.

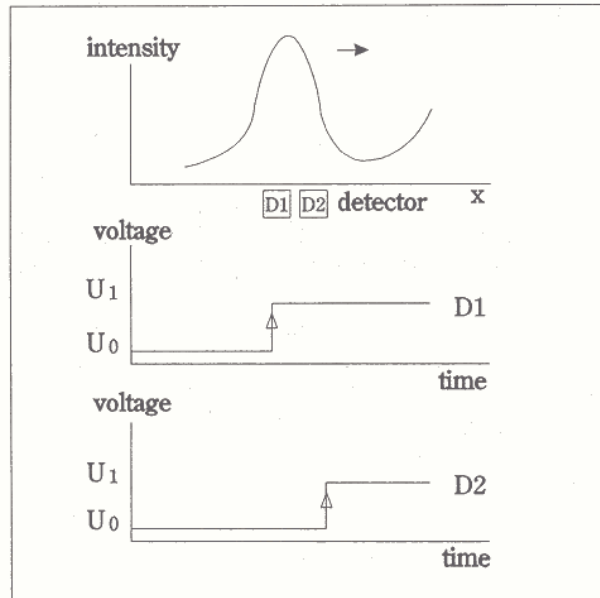
miruje u ravnotežnom položaju njihala seizmometra, bude nula. Tada bi vidljivost slike interferencije bila najveća, i opadala bi s udaljavanjem mjernog zrcala od ravnotežnog položaja, no odvajanje referentnog zrcala od djelitelja snopa bi otežalo izradu i ugađanje interferometra. Mjerno zrcalo je identično po optičkim svojstvima referentnom zrcalu naparenom na djelitelj snopa i postavljeno je na njihalo seizmometra.

Izvor zračenja – Za rad interferometra se koristi zračenje laserske diode TOLD 9200 Toshiba valne duljine 670 nm. Širina spektra zračenja te diode uz snagu od 3 mW iznosi 3 nm što uzrokuje malu duljinu koherencije, no u vrijeme izrade prototipa pretvornika nisu bili dostupne laserske diode užeg spektra čije bi se zračenje moglo vidjeti okom (što olakšava ugađanje interferometra). Dioda je hladena poluvodičkom toplinskom crpkom (Peltier element) na temperaturu od 14.8 °C, te je temperaturno i strujno stabilizirana (Abou-Zeid i Lepelt, 1985). Na taj se način postigla duljina koherencije nešto veća od 4 cm. Snop laserske diode je kolimiran plankonveksnom lećom žarišne duljine 1 cm i elipsastog je presjeka. Duža os elipse snopa nije veća od 4 mm. Kolimator laserske diode istovremeno je i nosač djelitelja snopa koji je učvršćen lisnatom oprugom.

Detektor – Broj prolazaka pruga interferencije i smjer njihova pomaka određuje se na osnovi signala dvaju detektora, slično kao kod miša u računalu. Detektori su dvije brze foto-diode SFH 250 čiji se signali pojačavaju operacijskim pojačalima LM 318 i pretvaraju u pravokutne Schmittovim okidnim sklopom. Uvjet da se iz tih signala može odrediti smjer pomaka je da jedna pruga interferencije istovremeno osvjetljava oba detektora, ali tako da jedan od njih bude prvi osvjetljen (slika 3). To se lakše postiže ako su detektori malih dimenzija. Zbog toga se svjetlo dovodi sa zaslona na foto-diodu svjetlovodom OKE 1000 promjera jezgre 1 mm.

Brojalo – Pravokutni signali detektora odvođe se na 16-bitno (4×4-bitno brojalo 4029) up/down CMOS brojalo koje radi u binarnom modu. Jedan od signala dovodi se na ulaz CLOCK, a drugi na ulaz UP/DOWN. Pri svakom porastu napona na ulazu CLOCK od 0 na +5V brojalo promjeni stanje za jedan. Ako je pri skoku napona na ulazu CLOCK napon na ulazu UP/DOWN +5V brojalo će uvećati stanje, a ako je ulaz UP/DOWN na naponu 0, stanje brojala će se umanjiti. Računalo očitava stanje brojala preko četiri CMOS D-latcha 4042 koji se prethodno blokiraju kako se broj ne bi promjenio u trenutku čitanja. Brojala 4029 i D-latch 4042 napajana su naponom +5V tako da izlazne signale ne treba prilagođavati računalu (rade na TTL naponima). Napon napajanja određuje i najveću radnu frekvenciju CMOS krugova koja je u ovom slučaju veća od 1 MHz.

Brojalo se na početku rada postavlja u stanje 0 (resetiranje). To bi trebalo učiniti u trenutku kada njihalo seizmometra miruje nezakočeno i bez vanjske pobude. Budući da je mirovanje njihala praktički nemoguće postići zbog mikroseizmičkog nemira, brojalo se resetira u proizvoljnom trenutku dok njihalo



Slika 3. Pomak pruge interferencije i odgovarajući signali detektora
Figure 3. Fringe displacement and corresponding detector signals.

oscilira zbog nemira. Stanje brojala će rasti od 0 do 32767 pri pomaku njihala u jednom smjeru, odnosno opadati će od 65535 do 32768 pri pomaku u drugom smjeru u odnosu na točku u kojoj se nalazilo njihalo u trenutku resetiranja. Smjer pomaka njihala kojem odgovara porast ili opadanje stanja brojala ovisi o tome koja od dvije foto-diode daje signal CLOCK a koja UP/DOWN i može se jednostavno izmjeniti prespajanjem svjetlovoda.

Međusklop i računalo – Izlaz pretvornika je 16-bitni binarni kod cijelog broja pomaka pruga interferencije. Da bi se mogao provjeriti rad uređaja taj broj je čitan računalom Atari 1040 ST preko paralelnog Centronics međusklopa i PIO 8255. Zbog ograničenja Centronicsa broj je čitan kao dvije 8-bitne riječi. Preko istog međusklopa se upravljalo brojalom (blokiranje i deblokiranje D-latcha i resetiranje brojala). Frekvencija uzorkovanja bila je određena brzinom izvođenja programa i iznosila je 33.4 Hz. Očitani brojevi su zapisivani na disketu neposredno prije prekida izvođenja programa. Zato taj registrijski sklop (računalo – međusklop – program) nije bio dobar za kontinuirani rad, ali je bio dovoljno dobar za provjeru rada pretvornika.

Razlučivost – Interferometrijski pretvornik broji prolaske pruga interferencije preko detektora, tako da se promatraju samo cjelobrojni redovi inter-

ferencije (Paić, 1983). Zbog toga je razlučivost pretvornika jednaka polovici valne duljine zračenja laserske diode i iznosi 335 nm. To je relativno mala razlučivost u odnosu na druge pretvornike, a mogla bi se povećati za dva reda veličine mjerenjem malih pomaka interferencijskih pruga na osnovu razlike intenziteta svijetlih i tamnih pruga (Aleshin et al., 1986), ili primjenom heterodine interferometrijske tehnike (Massi, 1987). Najmanji pomak njihala koji ima, pri razlučivosti od 335 nm, smisla promatrati iznosi barem pet do šest prolazaka interferencijskih pruga što je približno 2010 nm. Najveći pomak njihala koji uređaj može registrirati iznosi 21.9 mm (335×2^{16} nm). Najveći i najmanji pomak njihala koje pretvornik može zabilježiti i koje ima smisla promatrati ukazuju na mogućnost registriranja potresa u rasponu od četiri jedinice magnitude. Granične magnitude ovise o epicentralnoj udaljenosti. U slučaju da se instrument nalazi u neposrednoj blizini epicentra (epicentralna udaljenost oko 10 km) najslabiji potres koji se može jasno uočiti mora imati magnitudu, računatu prema izrazu za lokalnu magnitudu seizmološke postaje Zagreb (Cvijanović, 1977), veću ili jednaku 1.1, dok magnituda najjačega ne bi smjela biti veća od 5.2. Već na epicentralnoj udaljenosti od dva stupnja gornja granična magnituda potresa je 7.1, što znači da seizmograf registrira bez zasićenja praktički sve snažne potrese iz te ili veće udaljenosti ukoliko to dopušta mehanika seizmometra.

Uzorkovanje – Izlazna veličina interferometarskog pretvornika nije analogna veličina kao što je slučaj u drugih pretvornika. Zato se ne mogu koristiti niskopojasni analogni filteri (antialiasing filteri), te postoji opasnost od gubitka informacija zbog premale čestine uzorkovanja. Taj se problem može riješiti procjenom najveće moguće frekvencije oscilacija njihala uzrokovanih potresom pri čemu je amplituda pomaka njihala manja od razlučivosti interferometra (335 nm). U skladu s tim se određuje frekvencija uzorkovanja tako da bude barem dva puta veća od najveće moguće frekvencije osciliranja njihala (Candy, 1988).

Žarište potresa emitira seizmičke valove širokog frekventnog spektra, no oscilacije visokih frekvencija (od 5 do 10 Hz) se vrlo snažno prigušuju. Frekvencija kod koje počinje to snažno prigušenje naziva se granična frekvencija i ovisi o neelastičnosti rasjeda (Papageorgiou i Aki, 1983), odnosno, o hipocentralnoj udaljenosti i geologiji tla (Hanks, 1982). Za frekvencije veće od granične frekvencije spektar amplituda, promatrano u dalekom polju, opada s kvadratom frekvencije (Hanks, 1979). Budući da je zapis amplitude vala na seizmogramu proporcionalan spektru amplituda (Aki, 1967), amplitude oscilacija njihala smanjivati će se s kvadratom frekvencije. Pretpostavimo da je pomak njihala vlastitog perioda $T_0 = 0.5$ s jednak amplitudi seizmičkog vala frekvencije 2 Hz i iznosi 10 mm pri potresu intenziteta VIII °MSK. Tada bi pri frekvenciji od 350 Hz amplituda pomaka njihala bila manja od 330 nm. To je gruba i očito pretjerana procjena, no dovoljno je dobra za određivanje frekvencije uzorkovanja koja bi trebala biti 700 Hz.

Pogreške mjerenja – Do pogrešaka pri mjerenju položaja njihala interferometrom može doći iz dva razloga: zbog pogreške pri mjerenju valne duljine zračenja lasera i zbog pogreške razlučivosti.

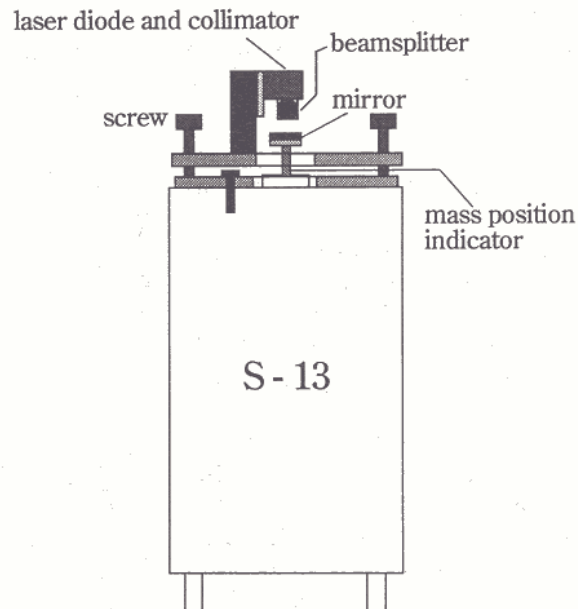
Valnu duljinu elektromagnetskog vala moguće je mjeriti točno do na 10^{-11} m. Izmjeri li se tako točno valna duljina lasera, pri najvećem pomaku njihala od 21.9 mm ukupna pogreška mjerenja zbog pogreške mjerenja valne duljine bila bi manja od 400 nm ili približno 0.002%. Pri manjim pomacima ta je pogreška u apsolutnom iznosu, dakako, manja.

Razlučivost pretvornika iznosi 335 nm. To znači da njihalo može oscilirati amplitudama manjim od 335 nm, a da to pretvornik ne zamijeti. Ta pogreška ne raste s povećanjem amplitude oscilacija njihala.

Ukupna pogreška pretvornika je pri najvećem odklonu njihala manja od 800 nm, što je praktički zanemarivo. Pri malim odklonima njihala prevladava pogreška zbog male razlučivosti i ukupna pogreška izražena u postotcima je veća. Tako pri pomaku njihala od 2010 nm ukupna pogreška mjerenja iznosi 16.6%, pri pomaku od 4010 nm 8.3%, dok je pri pomaku od 21 mm približno 0.002%.

3. Mjerenje

Rad pretvornika provjeren je na seizmometru S-13 Teledyne Geotech koji je radio u vertikalnom položaju. Kod tog seizmometra se njihalo giba po pravcu, te se zraka svjetlosti reflektirana na mjernom zrcalu vraća nazad u



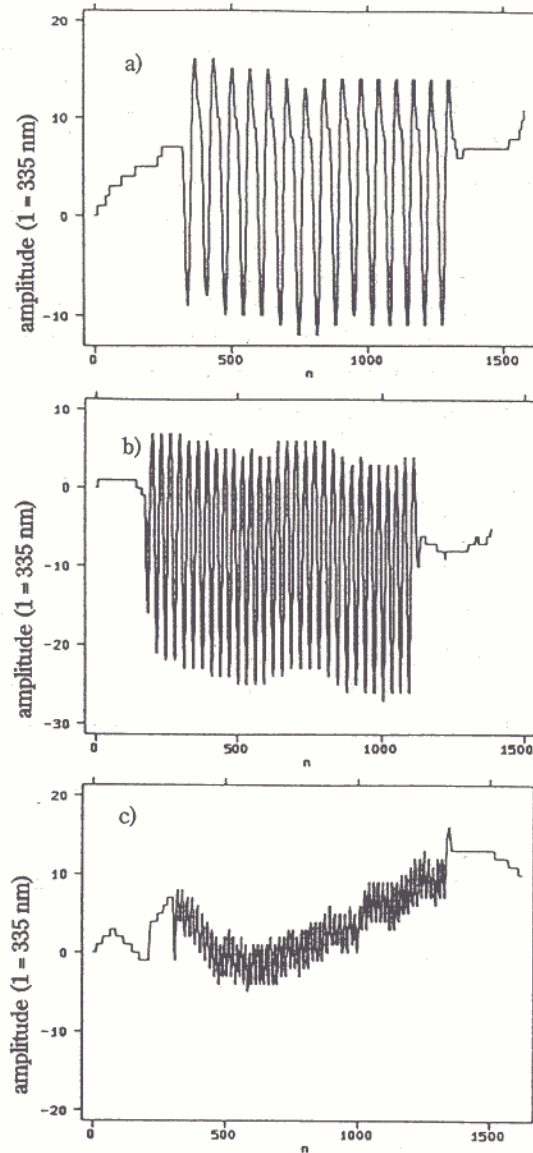
Slika 4. Interferometar na seizmometru S-13.

Figure 4. Interferometer on the S-13 seismometer.

djelitelj snopa. Budući da pri pomacima njihala većim od osam milimetara ono udara o kućište, S-13 nije najbolji seizmometar za rad s interferometarskim pretvornikom.

Mjerno zrcalo je postavljeno na indikator položaja njihala, dok je ostatak interferometra učvršćen vijkom za poklopac kućišta (slika 4). Njihalo je pobuđivano izmjeničnom strujom preko kalibracijske zavojnice motorne konstante 0.1947 N/A. Izvor pobude je bio digitalni seizmograf PDAS-100 koji je istovremeno registrirao oscilacije pomoću elektrodinamičkog pretvornika brzine s pomičnom zavojnicom (generatorska konstanta 618 Vs/m). PDAS-100 je mjerio brzinu pomaka njihala koju se moralo integrirati da bi zapis bio usporediv sa zapisom interferometra. Njihalo seizmometra mireno je otpornikom od 18 k Ω spojenim u paralelu s glavnom zavojnicom.

Ukupno je obavljeno sedam mjerenja. Pet mjerenja je obavljeno uz pobudu njihala kalibracijskom zavojnicom, dok je u dva slučaja njihalo bilo pobuđeno na titranje laganim dodirrom. Od pet mjerenja kod kojih je korištena kalibracijska zavojnica u tri je pobuđivano sinusoidalnim signalom frekvencije 0.5, 1 i 2 Hz najvećeg napona 1V i struje 1mA a u dva slučajno generiranim signalom gornjih graničnih frekvencija 5 i 10 Hz, najvećih napona 2 i 3V



Slika 5. Pomak njihala seizmometra S-13. Sinusoidalna pobuda a) 0.5, b) 1 i c) 2 Hz. Interferometarski zapis.

Figure 5. Displacement of the S-13 pendulum stimulated by sine signals of a) 0.5, b) 1 and c) 2 Hz and recorded by the interferometer

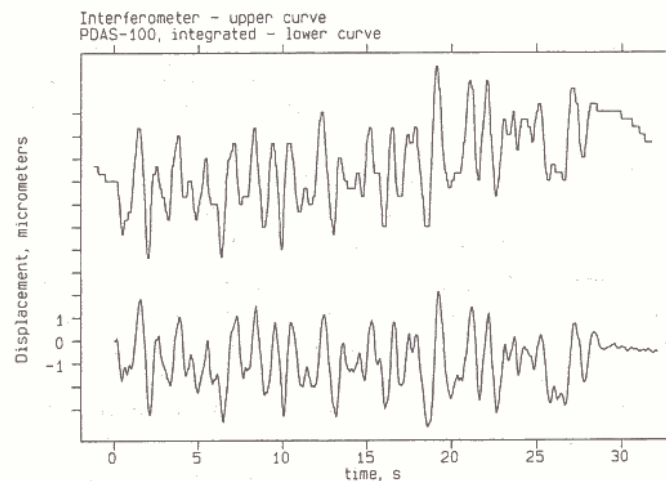
i struje 1mA. Pobuda strujom pri svakom mjerenju je trajala 30 s. Budući da signal-generator nije mogao pobuditi njihalo na titranje vidljivim pomacima čime bi se mogla provjeriti dinamika uređaja, mjereno je dva puta bez mirenja uz pobudu njihala dodirom. Rezultati mjerenja uz sinusoidalnu pobudu prikazani su na slici 5. Na dijagramu mjerenja pri frekvenciji pobude 0.5 Hz primjetna je asimetrija sinusoida što nije posljedica lošeg rada pretvornika već najvjerojatnije ima mehanički uzrok. Pri toj frekvenciji dvostruka amplituda pomaka iznosi 8385 ± 335 nm. Porastom frekvencije pobude na 1 Hz amplituda pomaka raste na 9715 ± 335 nm, da bi pri 2 Hz pala na 1675 ± 335 nm. Mjerenja pri višim frekvencijama nisu bila moguća jer je pomak njihala bio manji od 335 nm. Na slici 6 prikazana su usporedno mjerenja interferometrom i integrirana brzina mjerena pomoću PDAS-100 uz pobudu slučajno generiranim signalom. Uočava se vrlo velika sličnost tih zapisa. Postojeće razlike su, uglavnom, posljedice manje razlučivosti interferometra, što se i očekivalo. Slike 7 i 8 prikazuju pomake nemirenog njihala pobuđenog na osciliranje dodirom. Ta dva mjerenja provedena su zato da se provjeri stvarna dinamika uređaja, i nije bilo istovremenih registracija na PDAS-100. Naročito je zanimljiva slika 8 na kojoj se vidi da je pretvornik registrirao pomake amplituda od skoro jednog milimetra bez deformacija.

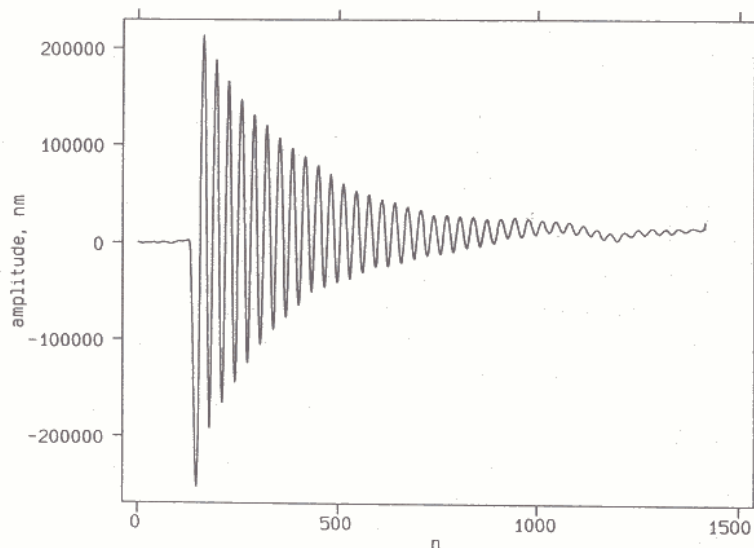
4. Prednosti i mane interferometarskog pretvornika u odnosu na postojeće pretvornike

U seizmologiji se, uglavnom, koriste dva tipa pretvornika pomaka: kapacitivni i induktivni. Oni amplitudno moduliraju napon iz vanjskog izvora, a pomak njihala je proporcionalan demoduliranom signalu. Vrlo su osjetljivi na

Slika 6. Pomak njihala S-13 registriran interferometrom (gore) i PDAS-100 (integral brzine, dolje). Pobuda slučajno generiranim signalom.

Figure 6. Displacement of the S-13 pendulum recorded by interferometer (upper curve) and PDAS-100 (integrated velocity, lower curve). Stimulation by random signal.





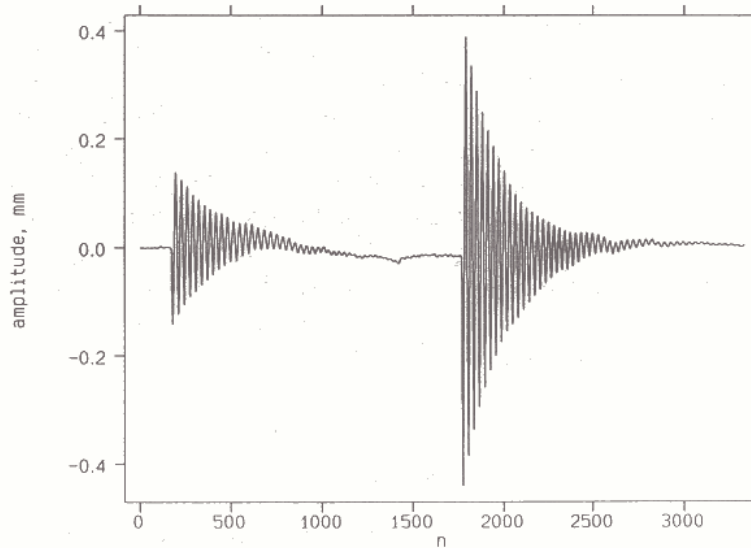
Slika 7. Interferometarski zapis pomaka njihala S-13 pobuđenog dodirom. Mirenje otpornikom od $2\text{k}\Omega$.

Figure 7. Displacement of the S-13 pendulum recorded by the interferometer (pushing stimulation, damping by resistor $2\text{k}\Omega$).

iskliznuće njihala iz ravnotežnog položaja zbog, na primjer, promjene temperature. Zato se povratnom vezom (pokretna zavojnica i magnet, pretvornik brzine) drži njihalo u ravnotežnom položaju, što može uzrokovati neželjene oscilacije njihala. Sklonost osciliranju je naročito izražena kod induktivnog tipa pretvornika. Za razliku od tih pretvornika, interferometar nije osjetljiv na iskliznuće njihala tako da bi ga morao držati u istom položaju. U slučaju iskliznuća dovoljno je resetirati brojalo i upamtiti pomak pri kojem je to urađeno. Zbog toga interferometar ne može uzrokovati neželjene oscilacije njihala.

Relativna pogreška mjerenja induktivskog i kapacitivnog pretvornika i njihovih pojačala je jednaka za sve amplitude za razliku od interferometarskog pretvornika kome relativna pogreška opada s porastom amplitude.

Teorijska razlučivost induktivnih i kapacitivnih pretvornika je određena termodinamičkim šumom njihala (Brownovo gibanje) od približno 0.1 nm . U praksi im je razlučivost znatno manja zbog šumova uzrokovanih opuštanjem opruga, promjenom okolnih uvjeta (temperature, tlaka), parazitskim rezonancijama mehaničkih dijelova i slično. Razlučivost interferometarskog pretvornika od 335 nm je skromna u odnosu na druge, ali bi se prije opisanim metodama mogla povećati za dva reda veličine.



Slika 8. Interferometrijski zapis pomaka njihala S-13 pobuđenog dodirom (bez mirenja).

Figure 8. Displacement of the S-13 pendulum recorded by the interferometer (pushing stimulation, without damping)

Za razliku od analognih pretvornika pomaka čiji se signali, da bi se mogli obrađivati računalima, moraju pojačati, filtrirati i digitalizirati, izlazna veličina interferometrijskog pretvornika je digitalna – broj prolazaka pruga – i odmah je spremna za obradu računalom.

Pri mjerenjima su uočeni i nedostaci pretvornika koji su posljedica nedostatnog iskustva pri odabiru komponenata i tehničkih rješenja pojedinih sklopova, odnosno, nedostupnosti boljih komponenata u trenutku izrade prototipa. Nedostaci su uočeni na laserskoj diodi, stabilizaciji laserske diode, detektorskom sklopu, međusklopu, programu i računalu.

Izvor zračenja korišten u prototipu pretvornika je laserska dioda TOLD 9200. To je jedna od prvih laserskih dioda koju je bilo moguće nabaviti na tržištu, a radila je u vidljivom dijelu spektra, zbog čega je i korištena. Glavni nedostatak joj je relativno velika širina spektra od približno 3 nm pri snazi od 3 mW zbog čega je i duljina koherencije zračenja mala. To ima za posljedicu lošu vidljivost slike interferencije i njeno znatno opadanje s porastom razlike duljina mjernog i referentnog kraka. Taj se nedostatak može lako ispraviti zamjenom laserske diode nekom drugom iz porodice TOLD 92xx, na primjer TOLD 9220 koja pri istoj snazi ima širinu spektra 0.1 nm.

Nekoliko desetaka minuta nakon uključivanja uređaja javljaju se, zbog velike toplinske tromosti nosača laserske diode, sinusoidalne oscilacije tempe-

rature koje se očituju na seizmogramu kao superponirani dugoperiodički valovi. Amplitude oscilacija se smanjuju, no one same nikada ne prestaju zbog temperaturne povratne veze. Dodatnom stabilizacijom valne duljine Fabry-Perotovim interferometrom to bi se moglo ukloniti (Stahlberg, 1985).

Zbog relativno slabe vidljivosti slike interferencije teško je ugoditi pragove Schmittova okidnog sklopa da oba detektora rade jednako. Taj se nedostatak najlakše može ispraviti povećanjem duljine koherencije izvora zračenja.

Glavna prepreka neprekidnom radu pretvornika su međusklop, računalo i program. Zato bi trebalo umjesto Atari ST 1040 računala koristiti IBM kompatibilna računala za koje postoje gotovi međusklopovi i programi za paralelni prijenos digitalnih podataka.

5. Zaključak

Pokazalo se da Michelsonov interferometar može raditi kao pretvornik relativnog pomaka njihala seizmometra. Zahvaljujući konstrukcijskim izmjenama kao što su korištenje kockastog djelitelja snopa i na njega direktno naparenog referentnog zrcala interferometar je bio dovoljno malen da radi na prenosivom seizmometru S-13 Teledyne Geotech. Malim dimenzijama znatno je pridonijelo i korištenje laserske diode kao izvora zračenja umjesto u strainmetrima uobičajenog helij-neon lasera. Razlučivost interferometarskog pretvornika je manja od razlučivosti pretvornika pomaka koji se sada koriste, ali je točnost mjerenja pri velikim pomacima njihala veća. Relativna pogreška mjerenja opada s povećanjem pomaka njihala. Osim toga, pretvornik jednako dobro registrira pomake svih frekvencija i nije osjetljiv na promjene elektromagnetskog polja okoline kao kapacitivni pretvornici, te ne može uzrokovati neželjene oscilacije njihala kao aktivni, naročito induksijski, pretvornici.

Sve komponente pretvornika i parametri rada odabrani su tako da pretvornik može brojati barem do 10^6 prolazaka pruga interferencije u sekundi. Uz 16-bitno brojalo to mu omogućuje registraciju potresa bez zasićenja u rasponu od četiri jedinice magnitude. Smanjenje relativne pogreške mjerenja s povećanjem amplitude oscilacija njihala i relativno mala razlučivost od 335 nm ukazuju na to da bi uređaj mogao biti podesan za registraciju blizih snažnih potresa.

Rad pretvornika je provjeren u laboratorijskim uvjetima na seizmometru S-13 čija mehanička izvedba ne omogućava korištenje svih mogućnosti pretvornika. Mjereni su položaji njihala pobudivanog sinusoidalnom strujom triju raznih frekvencija, slučajno generiranim signalom i dodirom. Zbog ograničenja računala i programa rabljenog u pokusu uređaj nije radio duže vrijeme bez prestanka i do sada nije registrirao niti jedan potres, no to su problemi koji nisu direktno vezani uz pretvornik.

Literatura

- About-Zeid, A. and Leppelt, G. (1985): Temperaturstabilisiert, abstimmbarer und modulierbarer Diodenlaser, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Abteilung Mechanik, Berichte Me-67, Braunschweig.
- Aki, K. (1967): Scaling law of seismic spectrum, *J. of Geoph. Res.*, **72**, No. 4, 1217-1231.
- Aleshin, V. A., Gorshkov, A. C., Dubrov, M. N., Ivanov, I. N. and A. G. Skenko (1986) Lazernij interferometr dlja deformograficheskikh nabljudenij v raionje surhovskogo tektonicheskogo razloma, *Fiz. Zemli* **3**, 80.
- Candy, J.V. (1988): Signal processing: the modern approach, McGraw-Hill Book Comp.
- Cvijanović, D. (1977): Function $\sigma(\Delta)$ for Earthquake Magnitude for short distances according to the data of the seismological station Zagreb, *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, **A-5** (116), 66-72.
- Hanks, T., C. (1979): b values and $\omega^{-\gamma}$ seismic source models: Implications for tectonic stress variations along active crustal fault zones and the estimation of high-frequency strong ground motion, *J. of Geoph. Res.*, **84**, No. B5, 2235-2242.
- Hanks, T., C. (1982): f_{\max} , *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, No. 6, 1867-1879.
- Massie, N., A. (1987): Digital heterodyne interferometry, *SPIE 816 Interferometric Metrology*, 40-48.
- Paić, M. (1983): Osnove fizike IV dio, Svjetlost – holografija – laseri, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb.
- Papageorgiou, A. S. and Aki, K. (1983): A specific barrier model for the quantitative description of inhomogenous faulting and the prediction of strong ground motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, No. 3, 693-722.
- Stahlberg, B. (1985): Control of laser frequencies using a Fabry-Perot interferometer and DAC techniques, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **18**, 1049-1053.
- Wielandt, E. (1983): Design principles of electronic inertial seismometers: Proc. of the intern. school of physics »Enrico Fermi«, Course LXXXV, North-Holand Pub. Comp.

Adresa autora: I. Sović, Geofizički zavod A. Mohorovičić, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Horvatovac bb, 41000 Zagreb