

Fazna stabilizacija lasera i redukcija šuma u optičkim vlaknima

Ana Kardum

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet,
Sveučilište u Zagrebu, Bijenička cesta 32, 10000 Zagreb

Mentor: dr.sc. Neven Šantić

Institut za fiziku, Bijenička cesta 46, 10000 Zagreb

(Dated: 20. siječnja 2025.)

U ovom je radu provedena stabilizacija diodnog lasera preko frekventnog češlja i ultra stabilnog optičkog rezonatora. Ovaj laser je potrebno dovesti do eksperimentalnog postava optičkim vlaknom za potrebe *clock* spektroskopije. Kako bi taj laser zadržao spektralnu širinu i nakon propagacije kroz optičko vlakno koristimo postav za aktivnu redukciju faznog šuma u optičkim vlaknima povratnom vezom. Optimizirali smo parametre ove povratne veze te karakterizirali redukciju šuma ovisno o frekvenciji.

I. UVOD

Precizno mjerenje vremena je od iznimne važnosti za rad tehnologija poput telekomunikacija [1], financijskih sistema [2] i GPS-a [3], ali i za istraživanja unutar znanosti, na primjer za proučavanje atomskih prijelaza (i drugih atomskih svojstava), napredovanje geodezije [4], provjeravanja relativističkih i gravitacijskih efekata [5] te fundamentalnih konstanti [6], pa sve do proučavanja sve-mira (vremena pulsara [7], tamna tvar [8],...).

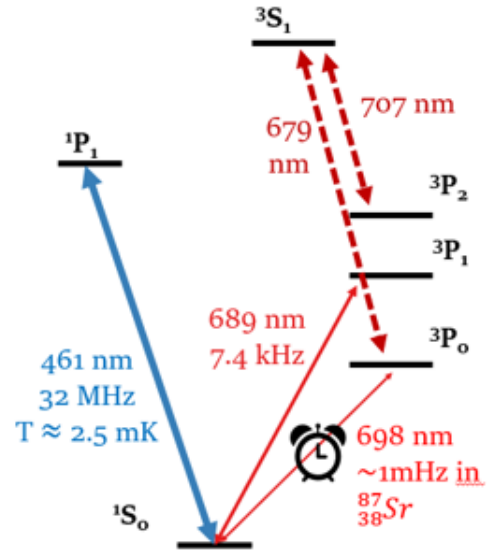
U svrhu preciznog mjerenja još je 1950ih napravljen cezije atomski sat, uređaj koji kao referencu koristi atomski prijelaz u atomu cezija. Detaljnije, prijelaz je između dva hiperfina osnovna stanja i ima frekvenciju 9.2 GHz (mikrovalno područje). Kao najpreciznija referenca svog doba, cezij je 1967. odabran za redefiniciju sekunde. Nakon toga se nastavila potraga za preciznijim opcijama te se veliki skok događa 2000tih izumom frekventnog češlja koji omogućuje mjerenje prijelaza u optičkom području (300 GHz do 3000 THz) što je veliko povećanje frekvencije i shodno preciznosti. S time u igru dolaze novi atomi, isprva vodik, kalcij i živa, a zatim aluminij, iterbij i stroncij [9]. Od njih vodstvo nedavno preuzima stroncij sa svojim $4s^2 \ ^1S_0 \leftrightarrow \ ^3P_0$ prijelazom na ≈ 430 THz-a. U 2024. godini na JILA institutu u SAD-u je naime napravljen stroncijev atomski sat s preciznošću od $8 \cdot 10^{-19}$ [10] postavši tako najtočniji sat na svijetu.

Ovaj je rad rađen u laboratoriju Grupe za kvantne tehnologije Instituta za fiziku kojem je cilj napraviti upravo stroncijev atomski sat, prvi u ovom dijelu Europe. Za eksperiment bitni prijelazi stroncija prikazani su na slici 1, a posebno je označen prijelaz na kojem će se temeljiti atomski sat (430 THz upravo odgovara valnoj duljini od 698 nm). Da bi atome stroncija pobudili u više stanje, trebat će nam diodni laser koji valnom duljinom točno odgovara željenom prijelazu. Da bismo ostvarili maksimalnu preciznost laser nam treba imati što užu liniju te mora biti stabilan u vremenu.

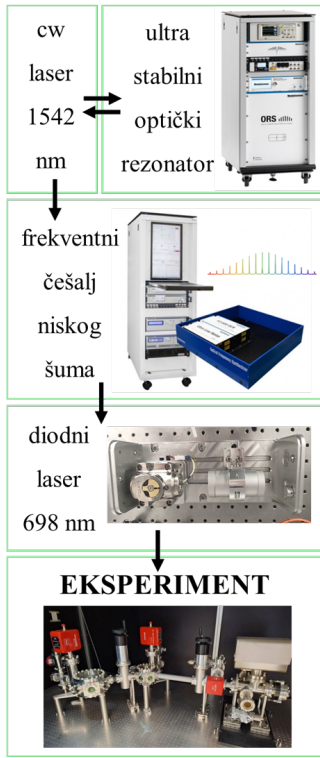
Prvi dio ovog seminara upravo će se baviti stabilizacijom 698 nm lasera, preko pomoćnog 1542 nm lasera, ultra stabilnog optičkog rezonatora i frekventnog češlja

kako je i prikazano na slici 2.

Drugi dio seminara odnosi se na postav za redukciju faznog šuma. Motivacija takve PNC (*phase noise cancellation*) petlje je provođenje optičkog vlakna od optičkog stola na kojem je *clock* laser do optičkog stola na kojemu se nalazi eksperiment. Pri tako dugačkom optičkom vlaknu očekuje se nakupljanje faznog šuma zbog vibracija i termičkih varijacija. Takve perturbacije uzrokuju lokalne promjene optičkog puta (što zbog promjene indeksa loma, npr. temperaturno, što zbog promjena u duljini puta (rastezanjem)). PNC petlja bi trebala korigirati takve promjene u stvarnom vremenu i tako omogućiti prijenos preciznosti stabiliziranog lasera kroz duga optička vlakna.



Slika 1. Prikaz prijelaza u stronciju s naznačenim valnim duljinama. Za prijelaz atomskog sata koristit će se linija 698 nm. Linije 461 nm i 689 nm služit će za hlađenje atoma, a 707 nm i 679 nm za *repumping* (vraćanje pobuđenih atoma u 1S_0 stanje).



Slika 2. Proces stabilizacije 698 nm lasera prije njegovog korištenja u eksperimentu.

II. PRINCIP RADA KORIŠTENIH KOMPONENTI

A. Optički rezonator

Optički je rezonator sustav zrcala u kojem se laserska svjetlost puno puta reflektira između zrcala prije nego se transmitira iz rezonatora. Najjednostavniji je sustav od dva ravna zrcala postavljena paralelno (planarni rezonator), ali takva konfiguracija nije stabilna već se tipično koriste konkavna zrcala koja mogu nadoknaditi male nepravilnosti u paralelnosti zrcala (neparalelna laserska zraka će biti odbijena prema unutrašnjosti rezonatora, dok bi kod ravnog zrcala bila odbijena vani i "izgubljena"). Budući da svjetlost pri odbijanju od zrcala stvara stojne valove, transmitirati se može samo svjetlost koja odgovara nekom od modova optičkog rezonatora. Za planarni rezonator se jednostavno izračuna frekvencija dopuštenih modova [11]:

$$f_q = \frac{q \cdot c}{2L} \quad (1)$$

gdje je q broj moda (> 1), c brzina svjetlosti, a L udaljenost zrcala. Za konkavne rezonatore se još pojavljuju i transverzalni modovi ali za određeni mod frekvencija i dalje ovisi samo o udaljenosti zrcala rezonatora. Ta udaljenost može fluktuirati pod vanjskim utjecajima pa se rezonatori visoke preciznosti (poput ultra stabilnog rezonatora korištenog u postavu ovog rada) posebno izoliraju

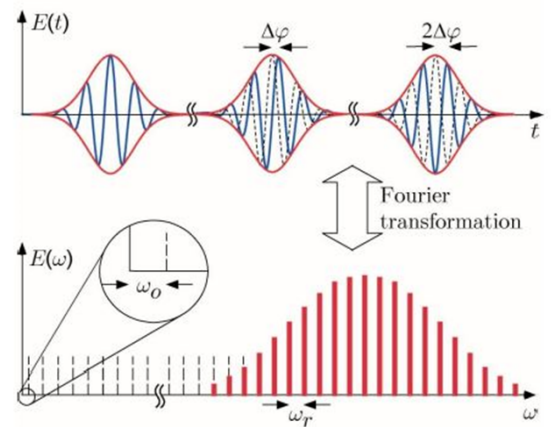
korištenjem visokog vakuumu, aktivne temperaturne stabilizacije, zvučne izolacije i aktivnih platformi za izolaciju od vibracija.

B. Frekventni češalj

Frekventni češalj je vrsta ultrakratkog pulsnog lasera kojem su modovi u fazi što onda nakon njihove interferencije dovodi do ekvidistantnog optičkog spektra vrlo uskih linija. Linije tako podsjećaju na zubce češlja (odakle i dolazi naziv), a ako su frekvencije tih zubaca poznate sustav se može koristiti kao optičko ravnalo za određivanje nepoznatih frekvencija. Razmak između spektralnih linija jednak je f_{rep} (textit{repetition rate}, vremenski razmak laserskih pulseva), ali modovi frekventnog češlja nisu samo harmonici $m \cdot f_{rep}$, nego postoji još i *carrier-envelope offset* (CEO) frekvencija. Naime envelope pulsa $A(t)$ s grupnom brzinom v_g kasni za "nosačem vala" (eng. *carrier wave* fazne brzine) kao što je prikazano na slici 3 pa to u spektru dovodi do frekvencijskog pomaka za $f_{CEO} = \frac{\Delta\varphi}{T}$. Frekvencije zubaca su tako:

$$f_m = f_{CEO} + m \cdot f_{rep}, \quad (2)$$

gdje je m veliki cijeli broj ($\approx 10^6$). To čini f_m visokom frekvencijom (područje THz-a) kakvu nije moguće direktno mjeriti pa se zato najčešće dobiva mjerenjem f_{CEO} i f_{rep} koje su u radijalnom području. Sam broj m se uglavnom prvi izračuna procjenom f_m -a nakon nastanka udara (objašnjen kasnije) s nekom grubo poznatom frekvencijom.



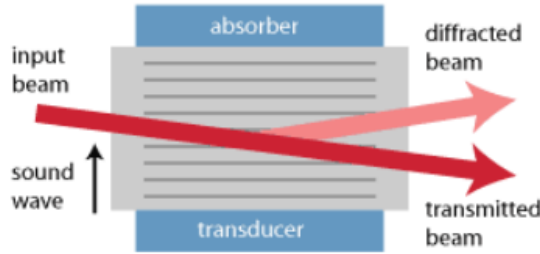
Slika 3. Puls frekventnog češlja prikazan u vremenskoj i frekventnoj domeni, s naznačenim faznim kašnjenjem envelope (gore:crvena linija) u odnosu na *carrier*(gore:plava linija) i CEO frekvencijom ovdje označenom s ω_0 . Slika je preuzeta iz reference [12]

C. AOM

Akustičko optički modulator (AOM) je uređaj koji pomiče frekvenciju svjetlosti koristeći zvučne valove. Prikazan na slici 4, AOM se sastoji od prozirnog kristala kroz koji *transducer* (potaknut oscilirajućim električnim signalom) propušta vrlo intenzivni zvučni val. On pri prolasku kroz kristal generira putujući val naprezanja (eng. *strain wave*, val pri kojem dolazi do deformacije materijala) koji fotoelastičnim efektom (=promjenom optičkih svojstva materijala zbog mehaničke deformacije) dovodi do putujuće rešetke promjene indeksa loma. Upadom svjetlosti na tu rešetku dolazi do difrakcije. Za upadnu zraku frekvencije f difraktirana će zraka imati frekvenciju:

$$f_{dif} = f + m \cdot F \quad (3)$$

gdje je F frekvencija zvučnog vala, a m red difrakcije.



Slika 4. Skica rada AOM-a. Detaljnije objašnjeno u referenci [13].

D. Fazni EOM

Električno optički modulator (EOM) je uređaj koji električnim signalom može, ovisno o vrsti, kontrolirati razna svojstva svjetlosti. Princip rada faznog EOM-a prikazan je na slici 5. Električno polje prolazi kroz kristal i mijenja mu indeks loma (proporcionalno jačini polja). Za svjetlost koja prolazi kristalom, promjena indeksa loma direktno se prenosi na promjenu faze po formuli:

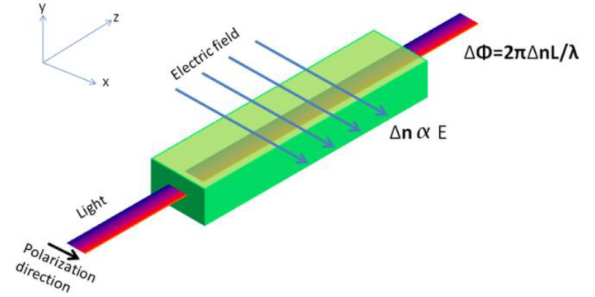
$$\Delta\Phi = \frac{2\pi \cdot \Delta n \cdot L}{\lambda} \quad (4)$$

gdje je Δn promjena indeksa loma kristala, L dužina kristala kojom prolazi svjetlost, a λ valna duljina svjetlosti. Detaljniji opis rada se može naći u referenci [14].

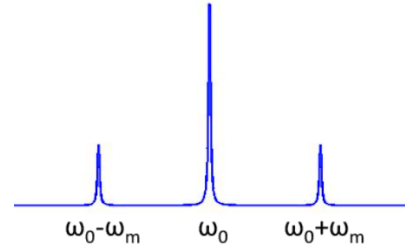
U slučaju kad se faza modulira sinusoidalno malim frekvencijama, izlazna svjetlost se može opisati kao 3 preklapajuća vala. To proizlazi iz razvoja u red [15]:

$$\begin{aligned} E_{mod} &= E_0 e^{-i\omega_0 t - im \sin(\omega_0 t)} \\ &\approx J_0(m) E_0 e^{-i\omega_0 t} + J_1(m) E_0 e^{-i(\omega_0 + \omega_m)t} \\ &\quad + J_1(m) E_0 e^{-i(\omega_0 - \omega_m)t} + \text{viši redovi} \end{aligned} \quad (5)$$

gdje je $E_0 e^{-i\omega_0 t}$ val prije EOM-a, m jačina modulacije, $J_n(m)$ Besselove funkcije, a ω_m frekvencija modulacije. Iz razvoja vidimo da je prvi preklapajući val nedomulirani "nosač" (eng. *carrier*), a ostala dva su njegovi *sidebands*, pomaknuti za $\pm$ frekvenciju modulacije. Te će nam *sidebands* (prikazane na slici 6) kasnije koristiti za mjerenje redukcije faznog šuma.



Slika 5. Skica rada faznog električno-optičkog modulatora, preuzeta iz reference [14].



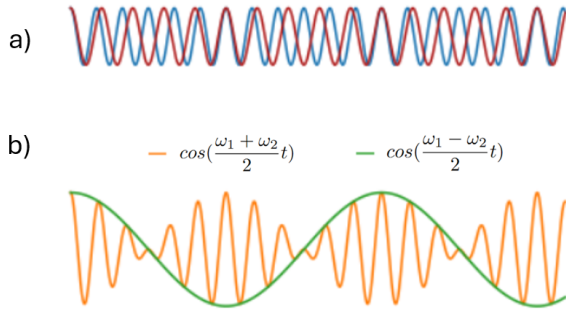
Slika 6. *Sidebands* nastale sinusoidalnom faznom modulacijom svjetlosti u EOM-u, s frekvencijom modulacije ω_m . Slika preuzeta iz reference [15].

E. Udar (eng. beat)

U ovom će se radu na više mjesta koristiti preklapanje svjetlosnih valova radi dobivanja udara. Pri padu tih valova na isti detektor dolazi do zbrajanja. To za početne frekvencije ω_1, ω_2 možemo prikazati kao:

$$\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t) = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right) \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \quad (6)$$

gdje je kosinus zbroja frekvencija označava brzo osciliranje vala, a kosinus razlike sporo mijenjanje amplitude, odnosno envelopu vala (kako je prikazano na slici 7). Zbroj frekvencija će pri slučajevima u ovom radu uvijek biti izvan raspona elektronike, tako da će opstati samo signal s razlikom frekvencija. Slična se miješanje frekvencija događa i u mikseru različitih električnih signala (imamo član s umnoškom kosinusa) pa se opet registrira razlika frekvencija ulaznih signala.



Slika 7. Prikaz nastajanja udara. a) Preklapanje dva vala malo različitih frekvencija. b) Zbroj valova koji rezultira u brzo oscilirajućem valu frekvencije $\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ sa sporo oscilirajućom amplitudom. Frekvencija udara je $|\omega_1 - \omega_2|$. Slika je napravljena u pythonu.

III. EKSPERIMENTALNI POSTAV I METODE

A. Postav stabilizacije

Stabilizacija se provodi kroz 3 koraka. Prvi korak je stabilizacija pomoćnog 1542 nm lasera na ultra stabilni optički rezonator. Drugi je stabilizacija frekventnog češlja na 1542 nm laser, a treći stabilizacija 698 nm lasera na frekventni češalj 2.

1. Ultra stabilni optički rezonator

Ultra stabilni optički rezonator (u ovom postavu ORS tvrtke Menlo Systems) sastoji se od jedno-modnog kontinuiranog lasera (erbij fiber, 1542 nm) stabiliziranog na optičkom rezonatoru ultra-visoke finese, napravljenom od ULE stakla (eng. *ultra-low expansion*). Erbij fiber laser je odabran zbog dobrog spektralnog poklapanja s frekventnim češljem i isplativosti. Shema postava prikazana je na slici 8. Dio svjetlosti lasera šalje se na fazni modulator (EOM) koji stvara *sidebands* (kako je objašnjeno u teoriji). Nakon EOM-a, lambda pločice i leća prilagođavaju intenzitet, polarizaciju i mod za ulazak svjetlosti u optički rezonator. Transmittirana svjetlost odlazi na kameru za vizualne provjere, a reflektirana dolazi na fotodetektor koji šalje signal u mikser PDH-a. Iz tog i signala modulacije EOM-a PDH stvara *error signal* (detalji opisani u referenci [11]) i šalje ga u SYNCRO lockbox, uređaj koji mijenjanjem struje (brzo) i temperature (sporo) dovodi i održava *error signal* na nuli, odnosno održava frekvenciju lasera na vrijednosti određenoj rezonatorom. Svaki laser međutim ima konačnu širinu linije (eng. *linewidth*) te je prije korištenja optičkog rezonatora kao reference nužno provjeriti je li ta širina (FWHM, *full width at half maximum*) unutar granice potrebne za planirane eksperimente. Jedan od načina mjerenja FWHM

je preko finese $\mathcal{F}$ kako je izvedeno u referenci [11]:

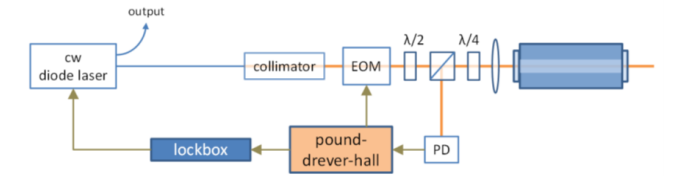
$$FWHM = \frac{f_{FSR}}{\mathcal{F}} \quad (7)$$

gdje je f_{FSR} udaljenost modova rezonatora (eng. *free spectral range*), a finesa je parametar optičkog rezonatora koji proizlazi iz refleksivnosti zrcala te se može izračunati iz tzv. *ringdown* vremena (=vrijeme potrebno da se nakon isključivanja pumpe intenzitet lasera, transmisijom fotona iz rezonatora, smanji za $1/e$). Prikaz *ringdown*-a je na slici 9, a izmjereno vrijeme τ (uz poznatu duljinu rezonatora L) se zatim koristi za dobivanje finese i FWHM:

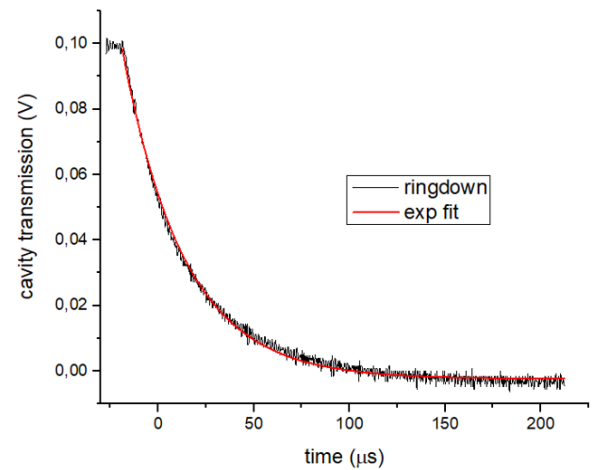
$$\mathcal{F} = \frac{\pi \cdot c \cdot \tau}{L} = (252\,000 \pm 2000) \quad (8)$$

$$FWHM = \frac{c}{2L} \cdot \frac{1}{\mathcal{F}} = (4\,960 \pm 40) \text{ Hz}. \quad (9)$$

Finese preko 200 000 i FWHM oko 5kHz su zadovoljavajući za postizanje visoke preciznosti (primjer u referenci [16] s $\mathcal{F} \approx 240\,000$ i preciznosti 0.536Hz).



Slika 8. Shema ultra stabilnog optičkog rezonatora. Optički rezonator je prikazan plavim pravokutnikom na desnom kraju slike, a ovalnim oblikom lijevo od njega prikazana je leća. Kratice: cw = kontinuirani val, EOM = električno optički modulator, $\lambda/2$, $\lambda/4$ = poluvalna, četvrtvalna lambda pločice, PD = fotodetektor. Slika preuzeta iz reference. [17]



Slika 9. Izmjeren *ringdown* ultra stabilnog optičkog rezonatora. Prilagodbom na eksponencijalnu funkciju dobiven je $\tau = (32.3 \pm 0.2) \mu\text{s}$.

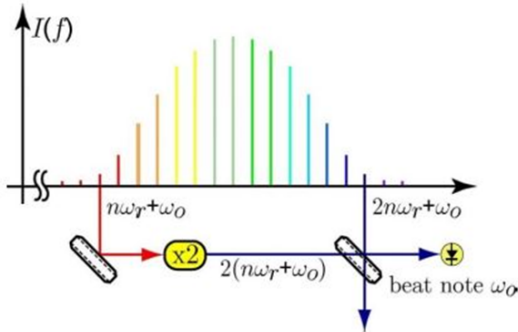
2. Stabilizacija frekventnog češlja

Frekventni češalj u ovom postavu je uređaj FC1500-250-ULN tvrtke Menlo Systems. Stabilizacija češlja svodi se na stabilizaciju njegove dvije odrednice: f_{rep} i f_{CEO} .

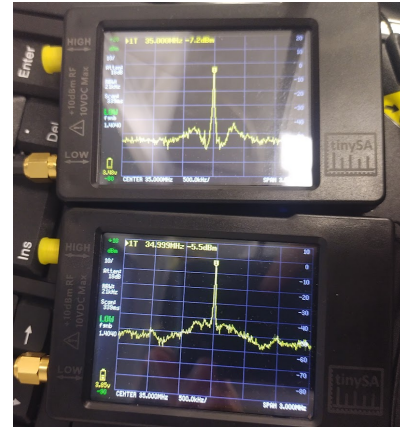
f_{rep} ovisi o duljini rezonatora koje možemo kontrolirati piezo kristalom i unutarnjim EOM-om. Njih pak kontrolira PID uređaj (*proportional-integral-derivative*, princip rada objašnjen u referenci [18]), ali mu je potreban *error signal* dobiven udarom s referentnom frekvencijom, u ovom slučaju laserom iz ultra stabilnog optičkog rezonatora. Taj signal se zatim uspoređuje s DDS (*direct digital synthesis*) signalom od 35 MHz pri čemu se dobiva željeni *error signal*. Odabirom DDS signala biramo željenu razliku f_{rep} -a od frekvencije rezonatorskog lasera, a 35 MHz je odabrano proizvoljno (jedini uvjet je $< f_{rep}/2$).

Za stabilizaciju f_{CEO} potrebna je tzv. f-2f interferometrija. Princip je prikazan na slici 10. n-ti mod s crvene strane spektra ($nf_{rep} + f_{CEO}$) provodi se kroz nelinearni kristal koji mu dupla frekvenciju ($2nf_{rep} + 2f_{CEO}$) te se zatim udara s frekvencijom 2n moda ($2nf_{rep} + f_{CEO}$). Signal iz udara će biti razlika frekvencija, što je upravo CEO frekvencija. Taj se signal zatim stabilizira miješanjem s DDS signalom (ponovno na 35 MHz) i PID-a, s tim da PID ovaj put djeluje preko sporog i brzog servo aktuatora. Spori djeluje na piezo kristal te popravljajući spore temperaturne oscilacije i dugoročne akustične perturbacije. Brzi aktuator utječe na struju lasera i popravljajući pomake uzrokovane brzim frekvencijskim šumovima. Time f_{CEO} namještamo i stabiliziramo na 35 MHz.

Na analizatorima spektra (11) možemo provjeriti da je izabrani mod češlja uspješno stabiliziran (metoda se još naziva *phase lock*), a zbog međusobne koherencije se to prenosi i na sve ostale modove. Stabilnost se tako s optičkog rezonatora, preko 1542 nm lasera, prenijela na frekventni češalj.



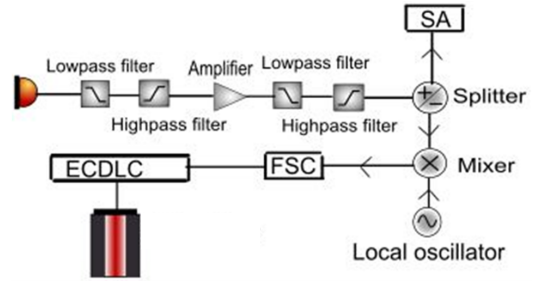
Slika 10. Stabilizacije CEO frekvencije frekventnog češlja f-2f interferometrijom. ω_r je razlika između spektralnih linija, ω_0 je CEO frekvencija, a n je broj moda. Za postav je nužan frekventni češalj s širinom oktave, što nije trivijalno za dobiti. Slika je preuzeta iz reference [12].



Slika 11. Uspješno stabilizirani udari f_{rep} (gore) i f_{CEO} (dolje) s DDS signalima na 35 MHz, kako se vide na analizatorima spektra.

3. Vezanje lasera na frekventni češalj

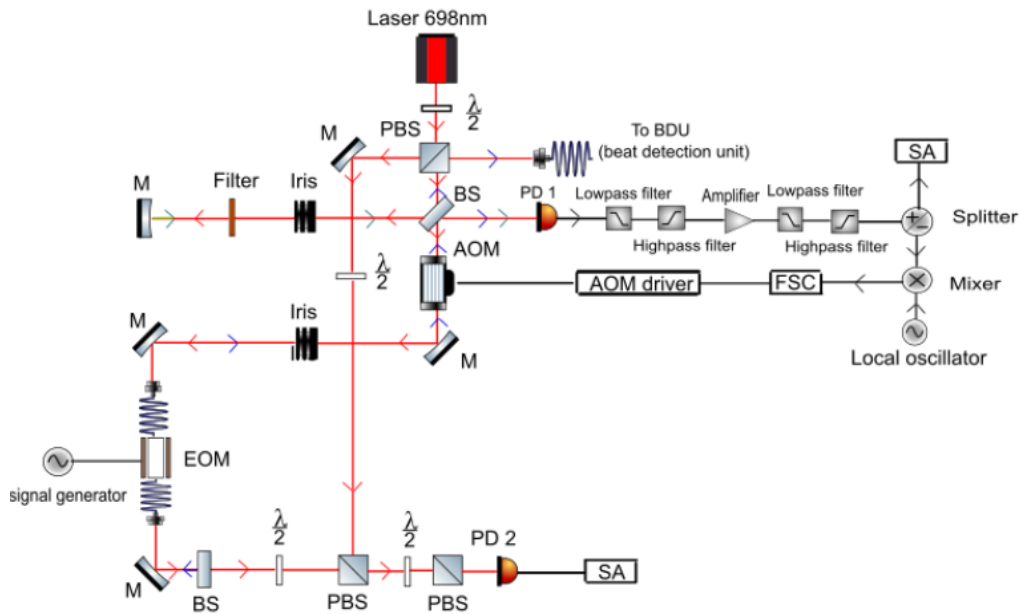
Laser 698 nm se na frekventni češalj također stabilizira metodom *phase lock*. Svjetlost se lasera udara s frekventnim češljem na fotodetektoru. Da bi udar bio uspješan zrake su polarizacijski usklađene korištenjem lambda pločica, a optičkom rešetkom je smanjen broj nebitnih modova frekventnog češlja na fotodetektoru. Fotodetektor zatim šalje električni signal kako je prikazano na slici 12. Na analizatoru spektra (SA) se pronalazi signal udara koji prije stabilizacije "frekvencijski šeće". Drugi dio signala se u mikseru miješa sa signalom od 35 MHz iz lokalnog oscilatora, i tako stvara *error signal* koji se šalje u FSC. FSC preko PID-ovih aktuatora (opisanih prije) stabilizira laser što se provjerava na analizatoru.



Slika 12. Shema elektroničkog postava *phase lock*-a, napravljena u labosu.

B. Postav za redukciju šuma

Na slici 13 prikazan je postav za redukciju šuma. Korišten je diodni laser valne duljine 698 nm. Postav se sastoji PNC petlje, a efikasnost provjeravamo s fotodetektorom unutar i izvan petlje.



Slika 13. Postav za redukciju šuma. Grana nad kojom piše "To BDU" je korištena za stabilizaciju lasera kako je prethodno objašnjeno. Zelene i plave strelice naznačuju odakle dolazi svjetlost na fotodetektor 1. Kratice: $\lambda/2$ – poluvolna lambda pločica, PBS-polarizirajući razdjelnik snopa, BS – razdjelnik snopa (refleksija 10%). M-zrcalo, PD-fotodetektor, AOM- akustično optički modulator, EOM-električno optički modulator, SA-analizator spektra, FSC-brzi servo kontroler.

1. Fotodetektor unutar petlje

Petlja dovodi dvije laserske zrake na fotodetektor 1 (PD1). Prva zraka je početni laser (f , ω_0) kojem smo uz pomoć filtera smanjili snagu (da ne bi došlo do preopterećenja detektora). Druga zraka je prošla kroz AOM ($f+m \cdot 80$ MHz), nakon čega je irisom propušten samo prvi red difrakcije ($m = 1$). Zatim je zraka prolaskom kroz EOM "skupila" fazni šum ($\omega_0 \pm \omega_m$) te se na BSu reflektirala nazad do fotodetektora 1. Pri stvarnom korištenju PNC petlje će na mjestu EOM-a biti optičko vlakno, a šum će doći iz okoline (kako je opisano u Uvodu). Budući da stjecanje šuma kod svjetlosti ne ovisi o smjeru propagacije druga će zraka jednostavno doći s duplim šumom ($\omega_0 \pm 2\omega_m$) i frekvencijom $f+160$ MHz. Udarom prve i druge zrake na fotodetektoru dobivamo signal centriran oko 160 MHz sa *sideband*-ovima na $\pm 2\omega_m$.

Da bi potisnuli dio signala koji nije oko udara postavljamo niskopropusne (<190 MHz) i visokopropusne (133-1000 MHz) filtere, a pojačalom osiguravamo da do miksera i analizatora dođe dovoljno signala. Analizator spektra koristimo da bi provjerili da je na fotodetektoru došlo do udara te kasnije za mjerenja. Mikser dosadašnji signal miješa s čistim signalom na 160 MHz dobivenim iz oscilatora. Rezultat je *error signal*, razlika faza između dvije grane petlje koja bi bez šuma bila nula. Uređaji FSC i Agile RF Synthesizer (slika 14) zatim upravljaju AOM-om mijenjajući frekvenciju i posljedično fazu. Pri tome su programirani tako da žele dovesti *error signal* na nulu, što efektivno znači stabilizaciju duljine optičkog puta do eksperimenta.



Slika 14. Gore: FSC (brzi servo kontroler), proporcionalni-integralni-derivacijski kontroler (PID). On stvara korektivni signal i šalje ga sintesajzeru. Dolje: Agile RF Synthesizer. On upravlja AOM-om. Unutarnji načini rada ovih uređaja objašnjeni u referencama [18] i [19]. Slike uređaja su preuzete s referenci [20] i [21].

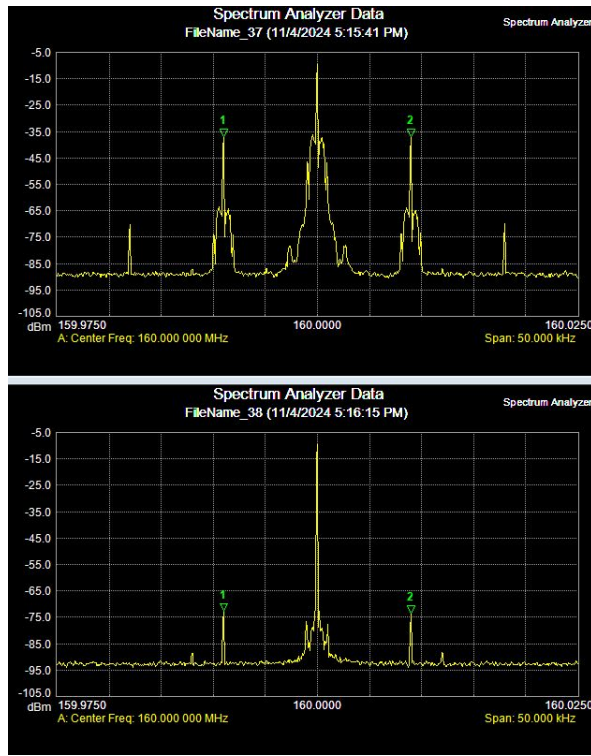
2. Fotodetektor izvan petlje

Mjerenje izvan petlje na fotodetektoru 2 skuplja originalnu svjetlost lasera (izdvojenu još na prvom polarizirajućem razdjelniku snopa, PBS) sa svjetlošću koja je prošla kroz AOM i EOM (jednom). Fotodetektor šalje signal na analizator spektra gdje vidimo signal udara centriran oko 80 MHz i sa šumom jednog prolaza kroz EOM. Ukoliko naš postav radi, uključivanje PNC petlje trebalo

bi maknuti ili bar značajno reducirati taj šum.

3. Mjerenja

Efikasnost petlje promatramo za različite frekvencije ω_m , u rasponu 1-80 kHz. Prije početka mjerenja smo preko FSC-a optimizirali atenuaciju šuma promatrajući signal na analizatoru spektra. Za svaku frekvenciju spremamo podatke analizatora spektra s isključenom i uključenom PNC petljom. Postupak smo radili u petlji (na fotodetektoru 1) i izvan nje (na fotodetektoru 2). Uzeli smo srednju vrijednost lijevog i desnog vrha šuma prije PNC-a te se oduzima ista srednja vrijednost poslije uključivanja PNC-a. Primjer jednog takvog mjerenja pokazan je na slici 15.



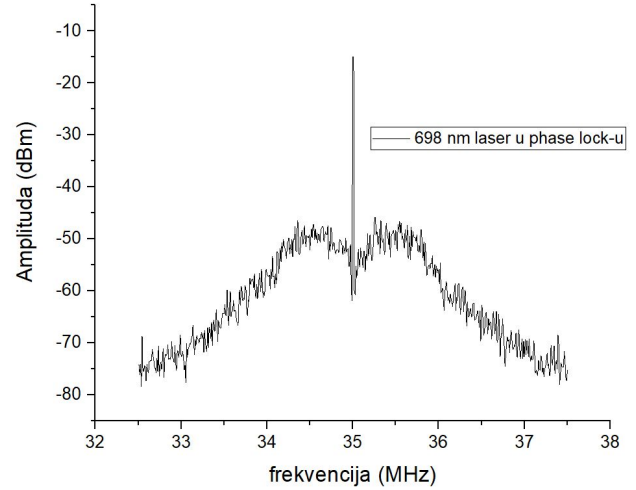
Slika 15. Prikaz "output"-a analizatora spektra unutar petlje na frekvenciji šuma $\omega_m = 7$ kHz prije i poslije uključivanja PNC-a s označenim (1,2) bočnim vrhovima šuma.

IV. REZULTATI

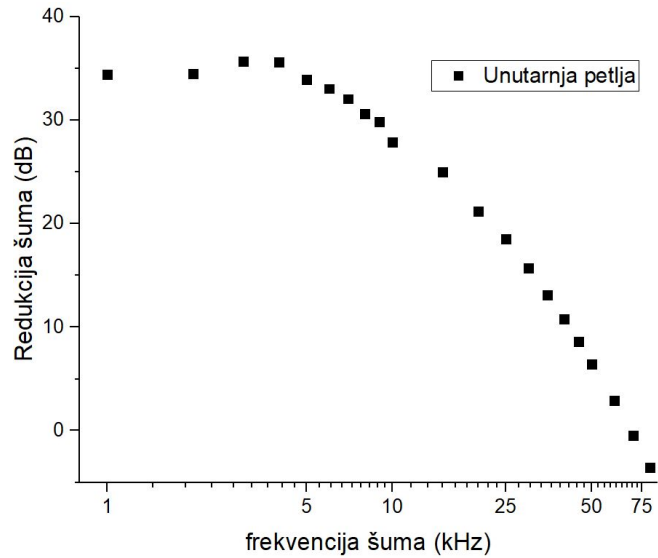
A. Stabilizacija lasera

Na slici 16 vidimo da je laser zadovoljavajuće stabiliziran: središnja linija signala je vrlo uska, te oko 30 dB jača od šuma (za šum frekvencijski blizu signala, a za dalji i oko 60 dB razlike). *Bandwidth* stabilizacije je širok,

oko pola MHz-a 16. Ta vrijednost označava u kolikom rasponu odmak od željene frekvencije (zbog neke vanjske perturbacije) će *phase lock* uspjeti vratiti frekvenciju na željenu, a pola MHz-a je standardan rezultat.



Slika 16. Stabilizacija 698 nm lasera preko udara s frekventnim češljem. Rezultat dobiven analizatorom spektra. *Bandwidth* se iščitava kao pola doline šuma oko vrha signala do *servo bump*-a,

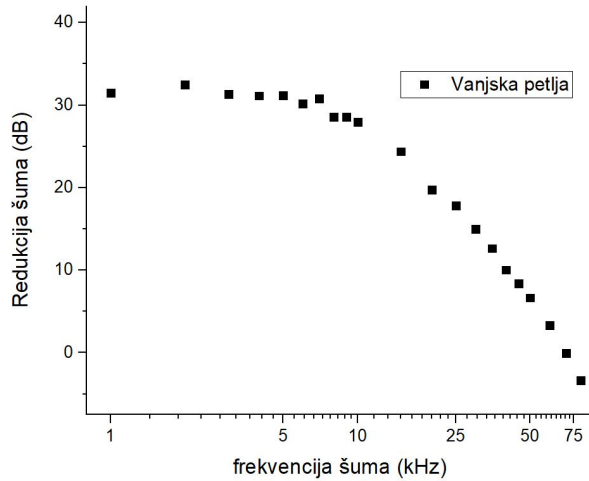


Slika 17. Redukcija šuma unutar petlje, prikazana u ovisnosti o frekvenciji nadodanog šuma (ω_m). Redukcija šuma prikazana je kao razlika (u dB) između srednje vrijednosti glavna dva vrha šuma (lijevi i desni *sideband* signala). Frekvencije na osi apscisa postavljene su u ln formatu.

B. Redukcija faznog šuma

Na slici 17 vidimo izmjerenu redukciju šuma unutar petlje u ovisnosti o frekvenciji šuma nametnutog EOM-om. Redukcija je značajna, posebice za šumove do 10 kHz. Vidimo da za te šumove PNC petlja izvrsno radi, primjećeni su padovi šuma od 30 dB, odnosno smanjenje 1000 puta. Do 5 kHz efikasnost PNC-a ne ovisi o frekvenciji šuma, a nakon toga pada eksponencijalno. Zadnje dvije točke na grafu (70 i 80 kHz) pokazuju negativnu vrijednost redukciju šuma. Znači da za tako brze šumove PNC ne uspijeva nadoknaditi šum već dapače nadodaje šumu svojom elektronikom.

Na slici 18 prikazana je redukcija šuma izvan petlje, ponovno u ovisnosti o frekvenciji šuma. Ovisnost je vrlo slična rezultatu unutar petlje, eksponencijalni pad iznad 5 kHz i prestanak efikasnosti za najviše frekvencije. Razlika je da je maksimalna redukcija vani nešto niža (30 umjesto 35 dB smanjenja šuma), a pad efikasnosti malo sporiji.



Slika 18. Redukcija šuma izvan petlje, prikazana u ovisnosti o frekvenciji nadodanog šuma (ω_m). Redukcija šuma prikazana je kao razlika (u dB) između srednje vrijednosti glavnih dvaju vrha šuma (lijevi i desni *sideband* signala). Frekvencije na osi apscisa postavljene su u ln formatu.

V. ZAKLJUČAK

U radu je uspješno obavljena stabilizacija 698 nm diodnog lasera preko pomoćnog 1542 nm lasera, ultra stabilnog optičkog rezonatora i frekventnog češlja niskog šuma. Krajnje dobivena *bandwidth* stabilizacije je oko pola MHz-a što obećava spektralnu širinu stabiliziranog lasera na ispod Hz-a. Tijekom procesa stabilizacije provedeno je mjerenje *ringdown* vremena rezonatora koje je dalo zadovoljavajuću finesu (preko 200 000) i FWHM (oko 5 kHz), a ostali su koraci stabilizacije provjereni na analizatorima spektra. Laser je tako spreman za daljnje korištenje u izradi stroncijevog atomskog sata.

Također je optimiziran i karakteriziran rad petlje za redukciju faznog šuma u optičkim vlaknima na umjetno dodanim šumovima frekvencija u rasponu od 1 do 80 kHz. Pokazano je da je petlja vrlo efikasna na frekvencijama ispod 10 kHz, a zatim efikasnost logaritamski pada. Za frekvencije iznad 70 kHz petlja ne uspijeva nimalo smanjiti fazni šum nego ga čak i povećava. Budući da su šumovi tako visoke frekvencije mnogo rjeđi, unutar laboratorija su uglavnom do 10 kHz, petlja će održati spektralnu širinu lasera u prijenosu optičkim vlaknima pri povezivanju atomskog sata s eksperimentima.

-
- [1] H. Imlau, Accurate and precise time and timing in telecommunication (2017).
 - [2] Safran, The significance of accurate time-keeping and synchronization in trading systems, <https://safran-navigation-timing.com/timekeeping-and-synchronization-in-trading-systems/>, white paper.
 - [3] J. Riley, A rubidium clock for gps (1982.).
 - [4] T. E. Mehlstäubler, G. Grosche, C. Lisdat, P. O. Schmidt, and H. Denker, Atomic clocks for geodesy, Rep. Prog. Phys. **81** 064401 (2018.).
 - [5] T. Bothwell, C. J. Kennedy, A. Aepli, D. Kedar, J. M. Robinson, E. Oelker, A. Staron, and J. Ye, Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample, Nature **602** 420–424 (2022.).
 - [6] Q. Terry and B. Keith, Introduction: The fundamental constants of physics, precision measurements and the base units of the si, Phil. Trans. R. Soc. A. **363**: 2101–2104 (2005.).
 - [7] N. F. Ramsey, Application of atomic clocks, in *Laser Physics at the Limits*, edited by H. Figger, C. Zimmermann, and D. Meschede (Springer Berlin Heidelberg,

- Berlin, Heidelberg, 2002) pp. 3–8.
- [8] Y. Tsai, J. Eby, and M. Safronova, Direct detection of ultralight dark matter bound to the sun with space quantum sensors, *Nat Astron* **7**, 113–121 (2023.).
 - [9] G. Popkin, A brief history of atomic time, NIST:<https://www.nist.gov/atomic-clocks/brief-history-atomic-time>, Pristupljeno 15. siječnja 2024.
 - [10] A. Aepli, K. Kim, W. Warfield, M. S. Safronova, and J. Ye, Clock with 8×10^{-19} systematic uncertainty, *Phys. Rev. Lett.* **133**, 023401 (2024).
 - [11] M. Đujić, *Stabilizacija optičkog rezonatora*, samostalni seminar iz istraživanja u fizici (2021).
 - [12] M. Systems, *FC1500-250-ULN user manual* ().
 - [13] R. Paschotta, Acousto-optic modulators, RP Photonics Encyclopedia, available online at https://www.rp-photonics.com/acousto_optic_modulators.html.
 - [14] I. Araci, Low-loss, high performance hybrid photonics devices enabled by ion-exchanged glass waveguides, (2010).
 - [15] J. Karlsson, *Cerium as a quantum state probe for rare-earth qubits in a crystal*, Ph.D. thesis, Lund University, Faculty of Engineering, LTH, Department of Physics, Division of Atomic Physics (2015).
 - [16] M. Systems, *Test report, ORS SN0070*, Tech. Rep.
 - [17] M. Systems, *UMAN ORS 1550 user manual* ().
 - [18] *MOGLabs FSC manual*.
 - [19] *MOGLabs ARF XRF user manual*.
 - [20] MOGLabs web stranica, <https://www.moglabs.com/products/laser-electronics/fast-servo-controller>, pristupljeno 7. siječnja 2025.
 - [21] MOGLabs web stranica, <https://www.moglabs.com/products/rf-electronics/agile-rf-synth>, Pristupljeno 7. siječnja 2025.