

UDK 531.768:528.526.6:621.396.62.041:629.783
Pregledni znanstveni članak / Review

O mogućnosti konstrukcije atomskih interferometrijskih žiroskopa i akcelerometara

Nikola SOLARIĆ, Miljenko SOLARIĆ, Goran PICHLER, Željko BAČIĆ – Zagreb¹

SAŽETAK. U uvodu je opisano kako su u posljednjih 30 godina smanjivane dimenzije GPS prijamnika od velikih dimenzija instrumenata do malih dimenzija u mobilima. Pritom je znatno povećana i točnost GPS prijamnika, ali ipak nisu riješeni svi problemi. Na primjer u slučajevima kada se ne mogu primiti GPS-signal koji su odaslani sa satelita, mogu se koristiti inercijski sustavi (žiroskopi i akcelerometri), koji za sada imaju relativno malu točnost. Kako bi se problemi riješili, Britansko ministarstvo obrane odlučilo je poboljšati te sustave financirajući projekte kojima se nastoje konstruirati točniji atomski interferometrijski žiroskopi i atomski akcelerometri, tj. atomski inercijski uređaji. Da bi to ostvarili primjenjuju snižavanje temperature pomoću tri para lasera u međusobno suprotnim smjerovima kao što je predloženo u otkriću za koje je dodijeljena Nobelova nagrada za fiziku 1997. godine. Osim toga, za to koriste Sagnacov i Ramanov efekt.

Ključne riječi: atomski interferometrijski žiroskopi, atomski akcelerometri, atomski inercijski uređaji.

1. Uvod

U posljednjih 30 godina naglo se razvijao satelitski Globalni pozicijski sustav (GPS) za određivanje položaja točaka na površini Zemlje. Prvi GPS-uređaji bili su teški i velikih dimenzija, a danas su GPS-prijamnici tako malih dimenzija da stanu u mobitele. O tom razvoju pisano je u Solarić (2006). Tijekom tog razvoja znatno se povećala i točnost određivanja položaja. Međutim, time nisu riješeni problemi kada signal sa satelita ne može doći do GPS-antene – prijamnika, na primjer: pod vodom (jer voda na površini djelomično reflektira GNSS-sigale, a

¹ Prof. emeritus dr. sc. Nikola Solarić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: nsolaric@geof.hr,

Prof. dr. sc. Miljenko Solarić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: miljenko.solaric@geof.hr,

Akademik prof. emeritus dr. sc. Goran Pichler, Institut za fiziku, Bijenička cesta 46, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: pichler@ifs.hr,

Prof. dr. sc. Željko Bačić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: zeljko.bacic@geof.hr.

zatim ih u vodi upija), u tunelima, na cestama u velikim usjecima, u gradovima između visokih i velikih zgrada itd. Tako na primjer podmornice prije zarona s površine moraju odrediti svoju poziciju GPS-prijamnikom, a pod vodom za orijentaciju im služe inercijski sustavi (akcelerometri i žiroskopi). Oni za sada nisu dovoljno točni tako da im je nakon vožnje tijekom jednog dana pogreška u određivanju pozicije podmornice velika, približno 1000 m (URL 3), a prema nekim izvorima čak i više. Na predavanju Bilajbegović (2014), na slajdu 7, navodi da se prema tvorničkim podacima klasičnim visoko-točnim inercijskim sustavima koji se upotrebljavaju na kopnu određuje položaj nakon jednog sata s točnosti 300 do 500 m. To je velika pogreška pogotovo kod nuklearnih podmornica koje mogu biti dugo pod vodom, a opasno je da će biti otkrivene ako izrone i GPS-prijamnikom odrede svoju poziciju. Kako bi se to poboljšalo, Britansko ministarstvo obrane financira projekt (vrijedan 270 milijuna funti u 4 godine) kojim će se povećati točnost atomskih žiroskopa i atomskih akcelerometara. Na tim se razvojem već duže vrijeme radi i u SAD-u, Kini, Australiji, a sigurno i u Rusiji. Uključile su se i tvrtke Nokia, Hitachi i Toshiba i osnovale kvantne istraživačke laboratorije u Velikoj Britaniji (URL 3).

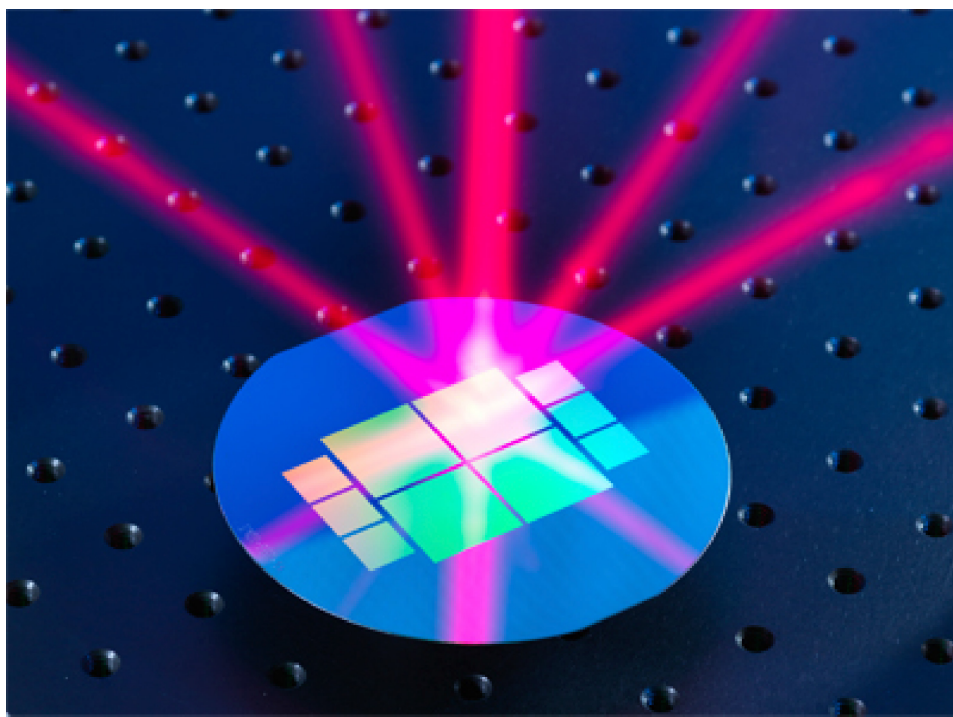
Kako bi konstruirali atomske žiroskope i atomske akcelerometre, znanstvenici i tehničari primjenjuju snižavanje temperature oblaka atoma pomoću lasera do približno 0 K ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) (i to točno na milijuntinku stupnja K). Sniženje temperature ostvaruju prema otkriću Stevena Chua, Claudea Cohena-Tannoudjia i Williama D. Phillipa, koji su za taj pronalazak dobili Nobelovu nagradu za fiziku 1997. godine (Solarić i dr. 2012). Atomi rubidija se dovedu u optičku stupicu i umire pomoću 3 para lasera. U svakom paru lasera snopovi svjetlosti su međusobno suprotno usmjereni, sijeku se u jednoj točki i međusobno su okomiti, tj. zatvaraju međusobno prave kutove. Tako umireni atomi rubidija i praktično ohlađeni na temperaturu apsolutne nule (0 K) sjedaju u osnovno stanje $|1\rangle$ (slika 5), (slika 4), (URL 1), (URL 2) i (URL 5). Oni su vrlo osjetljivi na zemaljsko gravitacijsko polje i elektromagnetno polje. Zatim se prate ti atomi rubidija drugim laserom i dobije dobra informacija o gibanju atoma. To omogućava dobivanje bitno točnijih podataka za navigaciju.

Kako ne bi trebalo uporabiti tri para lasera, snop lasera se može odvesti na rešetku (grupu atoma), nakon koje se difrakcijom dobije više snopova lasera pomoću kojih se hladi oblak atoma rubidija (slike 1.a i 1.b) (URL 5) i (URL 11, slajd 36). Tako se vidi da se već danas radi na smanjivanju pojedinih dijelova budućih atomskih interferometrijskih žiroskopa i akcelerometara.

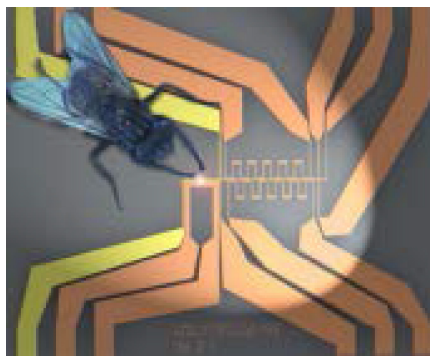
2. Atomski interferometrijski žiroskop

U literaturi se uz izraz atomski interferometrijski žiroskop upotrebljava i naziv kvantni žiroskop. Vjerujemo da je naziv atomski interferometrijski žiroskop pravilniji od izraza kvantni žiroskop, jer je i laserski žiroskop kvantni. U daljem tekstu nastojat će se opisati njihov rad na što jednostavniji način, bez nekih većih formula.

Prije objašnjenja rada atomskog interferometrijskog žiroskopa podsjetit ćemo da je Albert Einstein 1905. godine objasnio da svjetlost pokazuje dvojnju prirodu, tj. da se svjetlost može prikazati kao val ili kao čestice. De Broglie je 1924. godine u



Slika 1. a) Laserski snop pada na rešetku (grupu atoma) nakon koje se dobije više snopova pomoću kojih se može hladiti oblak atoma rubidija. Na taj način ne treba koristiti više lasera (URL 5).



Slika 1. b) Postignuto smanjivanje sklopa za dobivanje laserskog hlađenja atoma (URL 11).

disertaciji uveo hipotezu da čestice elektroni pokazuju dvojnu prirodu kao i svjetlost, što je nekoliko godina poslije dokazano. Za taj je doprinos dobio Nobelovu nagradu 1928. godine. De Broglie je pokazao da se gibanje elektrona može objasniti kao gibanje čestica i gibanje vala, tj. da elektroni pokazuju dvojnu prirodu (URL 18), (URL 6, strana 6332). Isto tako i atomi pokazuju dvojnu prirodu, tj.

moгу se prikazati kao gibanje čestica i kao gibanje paketa valova materije, a De Broglieova valna duljina vala atoma λ može se izračunati po formuli:

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (1)$$

gdje su:

h – Planckova konstanta

v – brzina atoma

m – masa atoma u pokretu.

Ta masa može se izračunati po formuli:

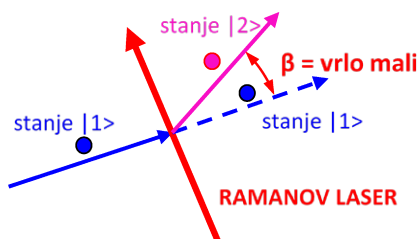
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (2)$$

gdje je m_0 masa atoma u mirovanju i c brzina svjetlosti. Kada se uvrsti jednadžba (2) u (1), dobije se da se valna duljina atoma može izračunati po formuli:

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx \frac{h}{mv}. \quad (3)$$

Paketi valova atoma mogu interferirati, a budući da valovi atoma imaju manju valnu duljinu od svjetlosti (URL 7), njihovom interferencijom postiže se preciznost i 10 000 puta veća nego kod optičkih interferometara (URL 8). Na taj način može se atomskom interferometrijom znatno povećati preciznost mjerenja, kod raznih vrsta mjerenja. Prvi atomski interferometar konstruiran je 1991. godine na MIT-u (Massachusetts Institute of Technology) u SAD-u u skupini Davida Pritcharda (URL 7).

Atomski interferometrijski žiroskop radi na principu Sagnacova efekta. U laserskom žiroskopu snopovi laserske svjetlosti idu u suprotnim smjerovima, dok u atomskom interferometrijskom žiroskopu različitim putovima u vakuumu idu ohlađeni atomi rubidija, i to u stanju $|1\rangle$ i $|2\rangle$. Kako bi se dobila dva snopa atoma rubidija koji idu različitim putovima upotrebljava se mehanički efekt svjetlosti (slika 2) (URL 8, slajd 9).

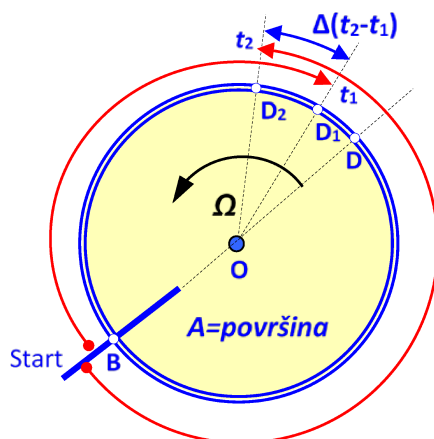


Slika 2. Mehaničko dijeljenje snopa atoma pomoću lasera (Ramanov efekt), pritom je kut β vrlo mali.

Ako je na obodu kružne ploče (na slici 3) postavljeno kružno optičko vlakno i ploča se ne okreće, a iz točke B se istovremeno ispusti svjetlost u oba smjera, tada će se one istovremeno sresti u točki D (u kojoj je smješten detektor) nakon jednako dugih prijedjenih putova. Međutim, ako kružna ploča rotira kutnom brzinom Ω , tada će svjetlost koja ide u smjeru suprotnom od rotacije stići do detektora u položaju D_1 u trenutku t_1 . Naime, zbog rotacije kružne ploče detektor se premjesti u točku D_1 , te će svjetlost stići nešto ranije od one upućene u smjeru rotacije ploče. Ta svjetlost upućena u smjeru rotacije ploče stići će do detektora (u međuvremenu pomaknutog) u točki D_2 u trenutku t_2 . Razlika tih vremena $\Delta(t_2 - t_1)$ ovisi o jednolikoj kutnoj brzini rotacije ploče Ω , brzini svjetlosti c , površini A lika čijim se obodom kreće svjetlost i valnoj duljini λ . Međutim, obično se zbog tehničkih razloga mjeri razlika pristiglih faza svjetlosti $\Delta\varphi$, a ne razlika vremena. Tako se iz jednadžbe

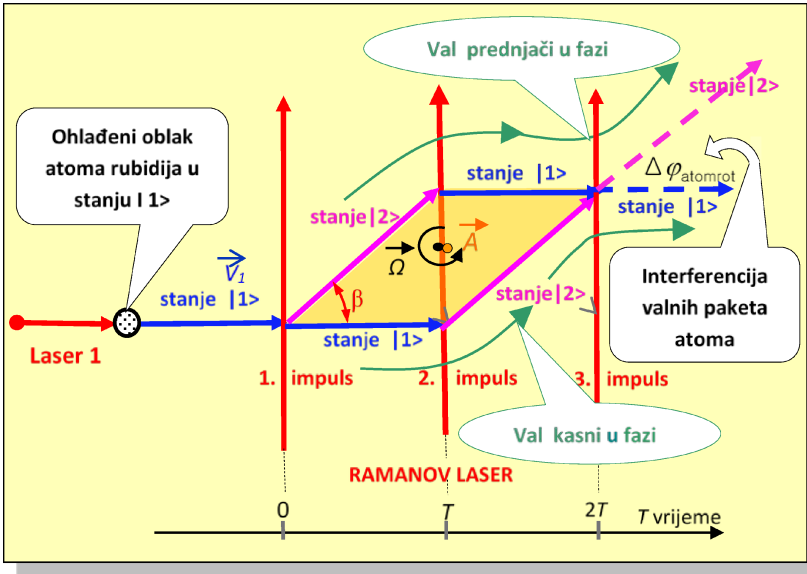
$$\Omega = \frac{\Delta\varphi \cdot c \cdot \lambda}{4\pi \cdot A}, \quad (4)$$

može izračunati kutna brzina rotacije zakreta laserskog žiroskopa. Više opisa o Sagnacovu efektu može se naći u (URL 8, URL 12, URL 15, Marjanović Kavanagh 2007, Benčić i Solarić 2008).



Slika 3. Grafički prikaz Sagnacova efekta koji nastaje kada ploča rotira konstantnom kutnom brzinom Ω (URL 15, str. 3–4).

Laser 1 nakon starta ispušta fotone svjetlosti (različite energije od energije $E_3 - E_1$ i $E_2 - E_1$) koji guraju atome iz ohlađenog oblaka atoma rubidija. Oni su ohlađeni na gotovo milijuntinku stupnja 0 K (tj. približno na $-273,15$ °C) i nalaze se u osnovnom stanju $|1\rangle$ (slika 4). Zatim na atome u stanju $|1\rangle$ padaju fotoni iz 1. impulsa Ramanova lasera, frekvencije koja odgovara energiji $E_3 - E_1$ rubidija pri prijelazu elektrona iz stanja $|1\rangle$ na virtualni nivo E_3 (URL 14), gdje se elektron vrlo kratko vrijeme zadržava i pada na nivo u stanju $|2\rangle$ (slika 5). Tada oni prelaze u stanje $|2\rangle$ i mijenjaju putanju (slika 2) (URL 8, slajd 9). U slučaju da atomi ne apsorbiraju fotone tada oni prelete i nastave put (slika 2).

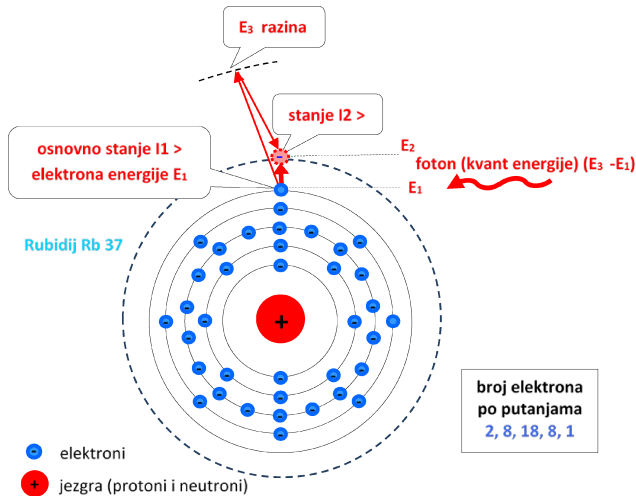


\vec{v}_1 – brzina atoma

\vec{A} – vektor površine je okomit na ravninu paralelograma (tj. na ravninu u kojoj su 1., 2. i 3. impuls Ramanova lasera)

$\vec{\Omega}$ – vektor konstantne kutne brzine zakretanja atomskog interferencijskog žiroskopa okomit je na ravninu paralelograma

Slika 4. Smjerovi u kojima se kreću ohlađeni atomi rubidija u stanju $|1\rangle$ i $|2\rangle$ u atomskom interferometrijskom žiroskopu pri konstantnoj kutnoj brzini njegova zakretanja.



Slika 5. Atom rubidija u osnovnom stanju $|1\rangle$. Kada foton kvanta energije $(E_3 - E_1)$ pada na atom rubidija u osnovnom stanju $|1\rangle$, tada elektron iz E_1 preskače na višu labilnu putanju E_3 i zatim prelazi na razinu E_2 u stanje $|2\rangle$.

Nakon 2. impulsa iz Ramanova lasera fotoni pobuđuju atome u stanju $|2\rangle$ da otpuste foton i prijeđu u stanje $|1\rangle$, a atome u stanju $|1\rangle$ da apsorbiraju fotone i prelaze u stanje $|2\rangle$ (slika 4).

Nakon 3. impulsa iz Ramanova lasera događa se analogna pojava i dolazi do interferiranja paketa valova atoma koji dolaze iz jednog i drugog smjera. Na temelju te interferencije može se odrediti koliko su duži put prevalili atomi u smjeru obrnutom od kazaljke na satu od atoma koji su se kretali u smjeru kazaljke na satu. Pritom se veličina faznog pomaka može izraziti jednadžbom:

$$\Delta\varphi_{\text{atomrot}} = \frac{4\pi \cdot m_{\text{atom}}}{h} \vec{A} \cdot \vec{\Omega}, \quad (5)$$

gdje su:

$\Delta\varphi_{\text{atomrot}}$ – fazni pomak koji se izmjeri pomoću interferencije

m_{atom} – masa atoma

h – Planckova konstanta

\vec{A} – vektor površine paralelograma koje zatvaraju putanje atoma

$\vec{\Omega}$ – vektor konstantne kutne brzine zakretanja žiroskopa.

Iz te jednadžbe, ako je kut između vektora \vec{A} i $\vec{\Omega}$ jednak nuli, može se odrediti veličina kutne brzine zakretanja kvantnog žiroskopa, te će biti:

$$\Omega = \frac{\Delta\varphi_{\text{atomrot}} \cdot h}{4\pi \cdot m_{\text{atom}} \cdot A}. \quad (6)$$

Fazni pomak koji nastaje zbog konstantne brzine zakretanja laserskog žiroskopa kod svjetlosti može se izračunati po formuli:

$$\Delta\varphi_{\text{svjrot}} = \frac{4\pi}{\lambda c} \vec{A} \cdot \vec{\Omega}, \quad (7)$$

gdje je c brzina svjetlosti, \vec{A} vektor površine koju obuhvaćaju suprotno usmjereni snopovi svjetlosti i λ valna duljina svjetlosti.

Kada su vektori površine paralelograma \vec{A} atomskog interferometrijskog žiroskopa i laserskog žiroskopa jednaki i vektori kutnih brzina zakretanja žiroskopa $\vec{\Omega}$ paralelni s vektorom \vec{A} , tada će i odnos faznih pomaka prema jednadžbama (3) i (5) biti jednak:

$$\frac{\Delta\varphi_{\text{atomrot}}}{\Delta\varphi_{\text{svjrot}}} = \frac{m_{\text{atom}}}{h / (\lambda c)},$$

a to je prema (URL 9) jednako

$$\frac{\Delta\varphi_{\text{atomrot}}}{\Delta\varphi_{\text{svjrot}}} \approx 10^{11}. \quad (8)$$

Dakle, ako atomski interferometrijski žiroskop i laserski žiroskop imaju istu površinu paralelograma A , tada će atomski interferometrijski žiroskop biti osjetljiviji od optičkih žiroskopa za faktor 10^{11} , jer atomi rubidija imaju znatno veću masu m_{atom} od fotona $[h/(\lambda c)]$.

Budući da je brzina kretanja atoma (oko 300 m/s) znatno manja od brzine svjetlosti (300 000 km/s), tada se, prema istraživanjima u (URL 5), atomskim interferometrijskim žiroskopom može izračunati brzina zakretanja žiroskopa i 1000 puta točnije nego laserskim žiroskopom. Ta točnost bila bi još veća da je kod atomskog interferometrijskog žiroskopa površina paralelograma A veća. Naime, kod atomskog interferometrijskog žiroskopa površina A obično je mala u odnosu na površinu A optičkog žiroskopa, jer fotoni Ramanova lasera ne uspijevaju jače zaokrenuti putanju atoma.

Može se napomenuti da će fazni pomak $\Delta\varphi_{\text{atomrot}}$ biti negativnog predznaka ako atomski snop dolazi s desne strane na slici 3. Osim toga, treba naglasiti da se samo s atomskim interferometrijskim žiroskopom ne može dobro odrediti rotacija ako istovremeno postoji osim rotacije i akceleracija. Naime, na svjetlost u laserskim žiroskopima ne djeluje akceleracija, jer na fotone praktično ne djeluje sila inercije pri akceleraciji. Međutim, kod atomskih interferometrijskih žiroskopa, gdje se atomi kreću zbog svoje mase, tj. inernosti masa, doći će pri akceleraciji do utjecaja akceleracije na rezultat mjerenja zakretanja atomskog interferometrijskog žiroskopa. Zato se i za taj utjecaj mora uzeti korekcija, tim više što je tipični pomak faza uzrokovan akceleracijom 5 do 6 puta veći nego onaj uzrokovan rotacijom (URL 6, str. 6334).

Budući da je površina A između razdvojenih snopova atoma rubidija u atomskim interferometrijskim žiroskopima obično vrlo mala, u raznim institutima nastoji se poboljšati njegov rad. Tako se pokušava riješiti taj problem vođenjem atoma u potencijalnom magnetskom polju (URL 6).

Predviđa se da će se tim žiroskopom moći potvrditi čak i neke postavljene pretpostavke u Einsteinovoj općoj teoriji relativnosti (URL 1).

3. Princip rada atomskog interferometrijskog akcelerometra

U literaturi nismo našli detaljnije opise atomskog interferometrijskog akcelerometra jer su u razvoju. Međutim, može se pretpostaviti da se i oni koriste hlađenim oblicima atoma. Tako ohlađeni atomi rubidija umireni pomoću laserskih snopova vrlo su osjetljivi u Zemljinu gravitacijskom polju, ali i na ubrzanje ili usporavanje sustava u kojem se nalaze. Osim toga osjetljivi su i na sile magnetskog polja. Iz akceleracije odnosno retardacije može se integracijom po vremenu odrediti brzina v po formuli:

$$v = \int_0^t a \cdot dt, \quad (9)$$

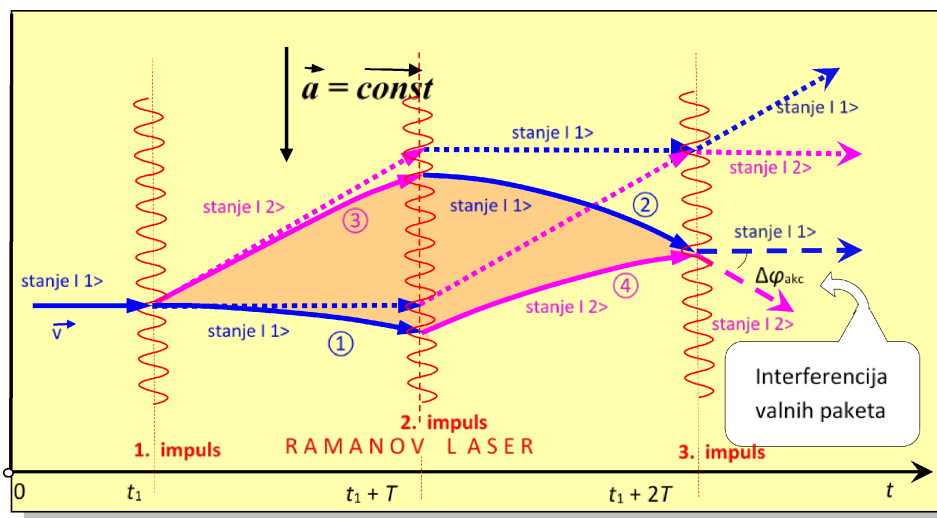
a zatim još jednom integracijom po vremenu može se izračunati i prijeđeni put s (Benčić i Solarić 2008, str. 919) po formuli:

$$s = \int_0^t v \cdot dt = \int_0^t \int_0^t a \cdot dt \cdot dt. \quad (10)$$

Prema tome, ako se izmjeri akceleracija sustava u kojem se nalazimo može se izračunati i brzina i prijeđeni put našeg sustava. Zato ako akcelerometrom izmjerimo akceleraciju a žiroskopima odredimo orijentaciju u prostoru, tada možemo izračunati i ostale parametre potrebne u navigaciji.

Princip određivanja akceleracije atomskim interferometrijskim akcelerometrima sastoji se u tome da se koriste De Broglieove valne duljine paketa valova atoma, koji se gibaju različitim putanjama i brzinama pod djelovanjem konstantne akceleracije akcelerometra. Kako bi se od jednog snopa atoma rubidija stvorile dvije putanje snopova koriste se tri impulsa Ramanova lasera (slika 6), a ima i prijedloga s četiri impulsa.

Zbog utjecaja konstantne akceleracije putanje atoma u atomskom interferometru nisu prave linije nego dijelovi parabola (URL 17), odnosno za linearne promjene akceleracije putanje atoma su hiperbole (URL 17). U radu je zbog jednostavnosti prikazan samo slučaj konstantnog ubrzanja.



Slika 6. Smjerovi u kojima se kreću ohlađeni atomi rubidija u stanju $|1\rangle$ i $|2\rangle$ u atomskom interferometrijskom akcelerometru, pri konstantnoj akceleraciji \bar{a} u ravnini Ramanovih impulsa lasera. Točkastim linijama označeno je kako bi se kretali atomski snopovi bez utjecaja akceleracije, a punim zakrivljenim linijama kreću se atomski snopovi pod utjecajem konstantne akceleracije.

Dužine putanja i brzine snopova atoma u jednom i drugom smjeru, pod utjecajem akceleracije, do točke gdje se sastaju nisu jednake i ovise o veličini akceleracije. Zato u točki susreta snopova atoma dolazi do interferencije valnih paketa atoma. Na temelju razlike duljina putova jednog i drugog snopa i brzine atoma može se izračunati fazni pomak između valnih paketa atoma. Veličina faznog pomaka $\Delta\varphi_{\text{akc}}$ koji nastaje kad na atome u akcelerometru djeluje konstantna akceleracija \bar{a} , može se izračunati prema (URL 16, str. 32), (URL 17, str. 33), (URL 8, slajd 14), (URL 10, slajd 17) i (URL 13, str. 41) po formuli:

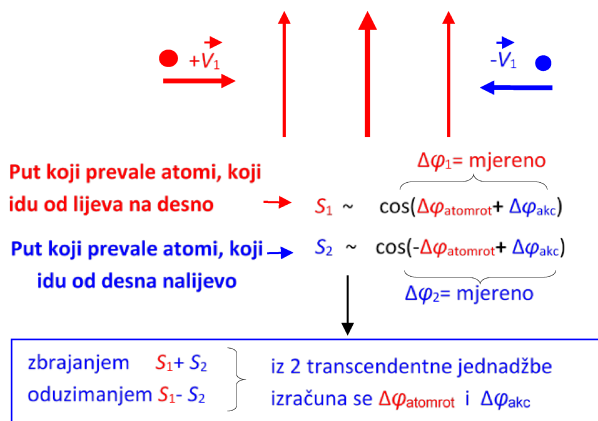
$$\Delta\varphi_{\text{akc}} = T^2 \bar{k} \cdot \bar{a}, \quad (11)$$

gdje je T vremenski period od prvog do drugog impulsa Ramanova lasera, a \bar{k} je vektor količine gibanja atoma. Pritom se veličina $\Delta\varphi_{\text{akc}}$ određuje interferometrijskim mjerenjem faznog pomaka između valnih paketa atoma, koji dođu kroz stranu 2 i 4 (slika 6), a na temelju toga može se izračunati veličina akceleracije (URL 17, str 33).

4. Istovremeno određivanje rotacije i akceleracije

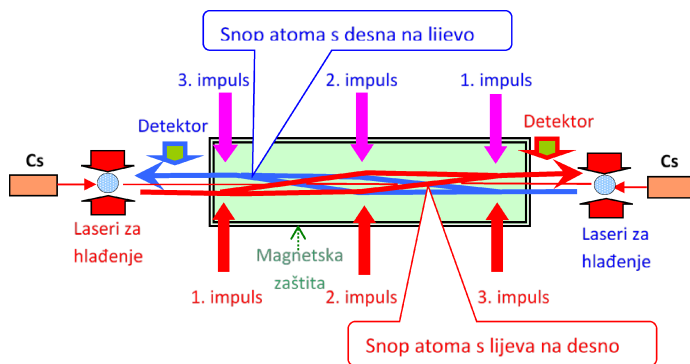
Za istovremeno određivanje rotacije i akceleracije izrađeni su instrumenti tako da jedan atomski snop dolazi s lijeve strane, kao na slici 3, a drugi atomski snop s desne strane (slika 8). Tada se analizom dobilo da je u interferenciji fazni pomak $\Delta\varphi_{\text{akc}}$ istoga pozitivnog predznaka kao i onda kad su atomi dolazili s lijeve strane, a fazni pomak $\Delta\varphi_{\text{atomrot}}$ je negativnog predznaka.

Na toj strani na slici 6 dobio se i fazni pomak nastao zbog rotacije $\Delta\varphi_{\text{atomrot}}$. Budući da se na istoj strani dobije $\Delta\varphi_{\text{atomrot}}$ i $\Delta\varphi_{\text{akc}}$, da bi se odredili fazni pomaci $\Delta\varphi_{\text{atomrot}}$ i $\Delta\varphi_{\text{akc}}$ izmjere se fazni pomaci jednom kad atomi dolaze s lijeve strane, a jednom kada dolaze s desne strane (slika 7 i 8). Pritom je na slici 7 prikazano da se zbrajanjem prijedjenih putova S_1 i S_2 može postaviti jedna jednadžba, a druga jednadžba dobije se oduzimanjem prijedjenog puta S_2 od prijedjenog puta S_1 . Zatim se iz te dvije transcendentne jednadžbe može izračunati kolika je fazna razlika izazvana rotacijom atomskog interferometrijskog žiroskopa i njegova akceleracija. Tako se može nakon integracije najprije izračunati brzina i nakon druge integracije prijeđeni put.



Slika 7. Grafički prikaz računskog razdvajanja rotacije i akceleracije (URL 8).

Takva kombinacija atomskog interferometrijskog žiroskopa i atomskog akcelerometra vjerojatno će se pokazati vrlo praktičnom i financijski najpovoljnijim rješenjem.



Slika 8. Shematski prikaz kombinacije atomskog interferometrijskog žiroskopa i akcelerometra (URL 16, slajd 42).

5. Princip rada atomskog inercijskog uređaja

Žiroskopi i akcelerometri ne mogu raditi proizvoljno postavljeni već se moraju postaviti na neku od platformi. Tako se klasični inercijski uređaji mogu postaviti na ova tri tipa platformi stabiliziranih s pomoću žiroskopa:

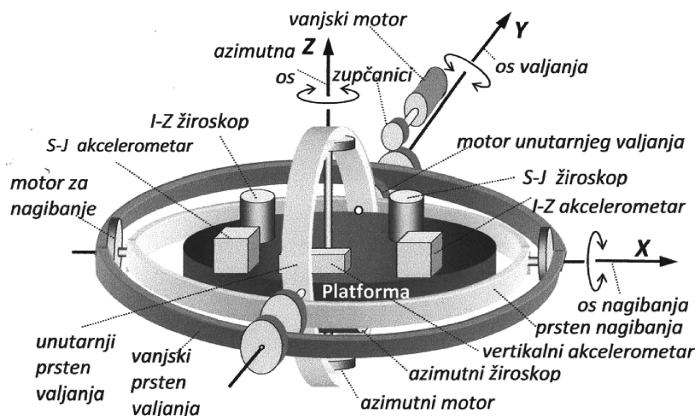
1. *Prostorno stabilizirana platforma* održava s pomoću žiroskopa stabilnu orijentaciju u prostoru kakvu je imala na početku gibanja.
2. *Lokalna vodoravna platforma* (slika 9) kontinuirano se zakreće tako da os z uvijek bude okomita na referentni elipsoid, a da su osi x i y neprestano usmjerene prema istoku, odnosno sjeveru. To je omogućeno na osnovi izmjerenog ubrzanja, tj. izračunate brzine i prijeđenog puta, ali i na osnovi digitalnog modela Zemljina gravitacijskog polja. Iz tih veličina računski se odredi pomak zenita, a te vrijednosti prenesu na davatelje momenta koji zakreću osi platforme u izračunati položaj.
3. *Strap down platforma (pričvršćena platforma)* (slika 10) slijedi sva gibanja vozila, tj. platforma inercijskog uređaja čvrsto je vezana za vozilo. Rotacije vozila u koje je postavljen inercijski uređaj detektiraju se žiroskopima i računski uzimaju u obzir. Do 1985. godine taj tip platformi nije se upotrebljavao u geodeziji.

Na shematskom prikazu klasične platforme FILS (na slici 9) vidi se da su na platformi smještene:

- 3 klasična akcelerometra [*S-J akcelerometar* (za pravac sjever – jug), *I-Z akcelerometar* (za pravac istok – zapad) i vertikalni akcelerometar]
- 3 laserska žiroskopa [*S-J žiroskop* (za pravac sjever – jug), *I-Z žiroskop* (za pravac istok – zapad) i *azimutni žiroskop*].

Klasična platforma održava se u određenom položaju u prostoru pomoću:

- 3 prstena (*unutarnjeg prstena valjanja*, *prstena nagibanja* i *vanjskog prstena valjanja*)
- 4 motora za rotaciju platforme (*azimutni motor*, *motor za nagibanje*, *motor unutarnjeg valjanja* i *motor vanjskog valjanja*), kao i 3 sinhronizatora.



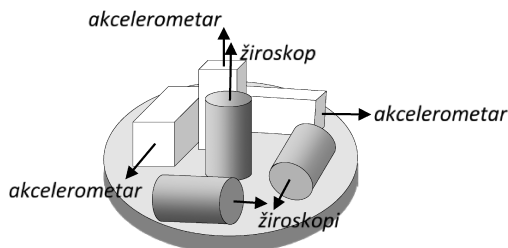
Slika 9. Shematski prikaz klasične kardanske platforme FILS s klasičnim akcelero- metrima i klasičnim laserskim žiroskopima.

Sigurno da je puna teorija gibanja tih platformi vrlo složena, jer se čovjek s uređajem kreće po Zemlji po nekim zakrivljenim putanjama s ubrzanjem ili usporavanjem, a istovremeno i Zemlja rotira oko svoje osi.

Atomski inercijski uređaji imat će analogne takve platforme kao klasični inercijski uređaji, ali elektronički modernizirane. Na njih će biti vjerojatno postavljena samo kombinacija tri atomska interferometrijska žiroskopa kojima će se određivati rotacija i akceleracija. S pomoću njih bit će znatno povećana točnost atomskih inercijskih uređaja u odnosu na dosadašnje klasične inercijske uređaje.

Prednosti mjerenja atomskim inercijskim uređajima pred klasičnim geodetskim mjerenjima i satelitskim GNSS-mjerenjima jesu:

- ne treba se dogledati početna i krajnja točka, kao pri klasičnim geodetskim mjerenjima
- nema problema s "vidljivosti" GNSS-satelita iznad horizonta mjerne točke, kao što je pri korištenju GNSS-satelita
- mogu raditi pod površinom mora, pod zemljom u tunelima, rudnicima, podzemnim garažama, a i u gusto izgrađenim gradskim četvrtima itd., što satelitski GNSS-prijamnici ne mogu.



Slika 10. Strapdown platforma (pričvršćena platforma) na kojoj su 3 akcelero- metra i 3 žiroskopa.

Zbog svojih prednosti atomski inercijski uređaji predstavljat će pravu revoluciju u izvođenju geodetskih mjerenja, ali i mjerenja općenito, i imat će veliku perspektivu razvoja. Međutim, valja naglasiti da će se atomskim inercijskim uređajima morati započeti mjerenje od točke s poznatim koordinatama, određenim satelitskom navigacijom GNSS ili na neki drugi način. Prema tome nije točno da GNSS-satelita neće trebati, kao što se navodi u neki člancima (URL 2, URL 3, URL 4), nego će s njima biti dovoljno rjeđe određivati poziciju točaka na Zemlji.

Osim toga ugradnja atomskih interferometrijskih žiroskopa i akcelerometara u umjetne Zemljine satelite omogućit će točnije određivanje njihovih položaja, i to sa znatno manjim brojem skupih satelitskih opažачkih postaja na Zemlji.

6. Zaključak

Očekuje se da će se dimenzije atomskog interferometrijskog žiroskopa i akcelerometra (danas su dimenzije približno 1 m^3) znatno smanjiti i da će se u budućnosti moći staviti i u mobitel (URL 2), kao primjerice GPS-prijamnici. Vjerujemo da to neće biti jednostavno i da će proći desetak i više godina dok se ne pronađu neki novi i bolji načini određivanja orijentacije i ubrzanja uz primjenu atomskih senzora. Osim toga, za pravilan i točan obračun položaja treba dobro poznavati i promjene ubrzanja sile teže na površini Zemlje, ali i pod površinom mora (URL 4). Kad se uhoda proizvodnja atomskih inercijskih uređaja njihova cijena bit će znatno niža od mehaničkih inercijskih sustava, za koje je potrebna skupa precizna mehanička proizvodnja žiroskopa. Korištenje atomskih interferometara ima prednost, jer imaju osobito visoku osjetljivost, dugu vremensku stabilnost i relativno jednostavnu proizvodnju, pa i mogućnost masovne proizvodnje (URL 13, str. 2). Ugradnja atomskih senzora za mjerenje ubrzanja i orijentacije u satelite omogućit će i točnije određivanje njihova položaja s manjeg broja opažачkih postaja na Zemlji, a ujedno će se njihovi položaji u orbitama moći točnije proračunati.

ZAHVALA. Zahvaljujemo recenzentima na korisnim savjetima.

Literatura

- Benčić, D., Solarić, N. (2008): Mjerni instrumenti i sustavi u geodeziji i geoinformatici, Školska knjiga, Zagreb.
- Bilajbegović, A. (2014): Istraživanje točnosti i pouzdanosti sustava INS/GNSS iTraceRT-F200-E pri navigaciji u tunelima, predavanje (slajd 7), održano na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 17. 9. 2014.
- Marjanović Kavanagh, R. (2007): Žiroskopi za orijentaciju i inercijalni navigacijski sustavi, Kartografija i geoinformacije, Vol. 6, izvanredni broj, 254–271.
- Solarić, M. (2006): Povijesni pregled smanjivanja dimenzija GPS-prijamnika, Geodetski list, 3, 153–171.
- Solarić, N., Solarić, M., Švehla, D. (2012): Nove revolucionarne mogućnosti u geodeziji koje pružaju otkrića za koja su dobivene Nobelove nagrade za fiziku 2005. i 1997. godine, Geodetski list, 1, 1–19.
- Voronkov, N. N., Ašimov, N. M. (1973): Girokopičeskoe orientirovanie, Nedra, Moskva.

Mrežne adrese

- URL 1: Eugenie Samuel: Quantum gyroscope could reveal Universe's spin, New Scientist, <http://www.newscientist.com/article/dn2526-quantum-gyroscope-could-reveal-universes-spin.html>, (30. 6. 2014.).
- URL 2: Kvantna navigacija bez satelitov, <https://slo-tech.com/novice/t610161>, (30. 6. 2014.).
- URL 3: British MoD works on 'quantum compass' technology to replace GPS, <http://rt.com/uk/159256-uk-defense-gps-compass/>, (30. 6. 2014.).
- URL 4: Paul Marks: Quantum positioning system steps in when GPS fails, New Scientist, http://www.newscientist.com/article/mg22229694.000-quantum-positioning-system-steps-in-when-gps-fails.html#.U7ZSzv1_u7k, (15. 7. 2014.).
- URL 5: Hamish Johnston: A quantum accelerometer is being built for navy submarines, <http://physicsworld.com/cws/article/news/2014/may/26/quantum-accelerometer-is-being-built-for-navy-submarines>, (15. 7. 2014.).
- URL 6: Jian Cheng Fang, Jie Qin (2012): Advances in Atomic Gyroscopes: A View from Inertial Navigation Applications, Sensors, 12, 5, 6331–6346, <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/5/6331>, (16. 8. 2014.).
- URL 7: Atomska interferometrija, <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=4481>, (18. 8. 2014.).
- URL 8: Ernst Rasel, Wolfgang Ertmer: Perspectives Inertial Sensors Based on Cold Atoms, <http://physics.uq.edu.au/ACQAO/workshops/LesHouches/ERTMER.pdf>, (18. 8. 2014.).
- URL 9: Wolfgang Ertmer: Atomic Quantum Sensors Based on Cold Atoms, <http://www.ifraf.org/IMG/pdf/Ertmer-1r.pdf>, (18. 8. 2014.).
- URL 10: David Marvin Slaughter Johnson: Long Baseline Atom Interferometry (strana 17), <http://web.stanford.edu/group/kasevich/cgi-bin/wordpress/wp-content/uploads/2012/11/johnsonThesis.pdf>, (18. 8. 2014.).
- URL 11: Mark Kasevich: Science and technology prospects for ultra-cold atoms, http://www.dmphotonics.com/Tekhnoscan/kasevich_CAMOS_021124.pdf, (18. 8. 2014.).
- URL 12: A Simple Description of the Sagnac Effect, http://www.physicsinsights.org/sagnac_1.html, (9. 9. 2014.).

- URL 13: Ken Takase: Precision Rotation Rate Measurements with a Mobile Atom Interferometer,
http://web.stanford.edu/group/kasevich/cgi-bin/wordpress/wp-content/uploads/2012/09/Ken_Takase_thesis.pdf, (10. 10. 2014.).
- URL 14: SAI: A compact atom interferometer for future space missions,
<http://www.physik.hu-berlin.de/qom/pdfs/SorrentinoEtAl2010.pdf/view>, (29. 10. 2014.).
- URL 15: Todd L. Gustavson: Precision Rotation Sensing using Atom Interferometry,
<http://web.stanford.edu/group/kasevich/cgi-bin/wordpress/wp-content/uploads/2012/09/GustavsonThesis.pdf>, (29. 10. 2014.).
- URL 16: Todd L. Gustavson: Cold Atom Gyros,
http://ieee-sensors2013.org/sites/ieee-sensors2013.org/files/Gustavson_Slides.pdf,
(6. 10. 2014.).
- URL 17: Peters, A., Chung, K. Y., Chu, S. (2001): High-precision gravity measurements using atom interferometry, *Metrologia*, 38, 25–61,
<http://www.atomwave.org/rmparticle/ao%20refs/aifm%20refs%20sorted%20by%20topic/inertial%20sensing%20refs/gravity/PCC01.pdf>, (11. 11. 2014.).
- URL 18: Louis de Broglie,
https://hr.wikipedia.org/wiki/Louis_de_Broglie, (3. 11. 2015.).

About the Possibility of Construction Atomic Interferometric Gyroscopes and Accelerometers

ABSTRACT. In the introduction, described how in the past 30 years resized dimensions of GPS receivers from of large size instruments to small size in mobile phones. In the same time also the significantly increased the accuracy of the GPS receivers, but still not solved all the problems. For example, problems when receivers cannot receive GPS signals which broadcast the GPS satellites. In such cases, can be used inertial systems (gyroscopes and accelerometers) that currently have a relatively low accuracy. In order to solve these problems the British Ministry of Defence has decided to improve it. Therefore, they financed projects for construction a more accurate atomic interferometric gyroscopes and atomic accelerometers, i.e. the atomic inertial devices. To do that they used lower the temperature by three pairs of lasers in mutually opposite directions as proposed in the discovery for which the Nobel Prize in Physics in 1997. In addition, they are using Sagnac's and Raman's effects.

Keywords: atomic interferometric gyroscopes, atomic accelerometers, atomic inertial devices.

Primljeno / Received: 2015-07-17

Prihvaćeno / Accepted: 2015-11-06