

Primerjalne meritve Overhouserjevega protonskega gradiometra

Rudi Čop, Pavel Kosovac*

Povzetek

Eden od osnovnih merilnih instrumentov za merjenje zemeljskega magnetnega polja je skalarni protonski magnetometer. Njegov proizvajalec navaja in tudi zagotavlja njegove merilne karakteristike. Ko pa je tak magnetometer tudi izhodiščni merilni instrument, mu je potrebno preveriti njegove karakteristike s pomočjo primerjalne meritve. Primerjalna meritev se opravlja v magnetno čistem okolju s pomočjo sistema tuljav, ki ustvarja homogeno magnetno polje. Stalna gostota tega magnetnega polja se vzdržuje s pomočjo regulacije. Rezultati take primerjalne meritve odkrivajo lastnosti merilnega instrumenta in se uporabljajo za njegovo nadaljnje preverjanje.

Uvod

Elektronske merilne instrumente za zemeljsko magnetno polje so začeli razvijati v tridesetih letih prejšnjega stoletja. Pospešeno so jih začeli uporabljati in izpopolnjevati med drugo svetovno vojno in tudi po njej (Nabighian et al., 2005; Csontos et. at., 2006). Merilna občutljivost se je v obdobju od sredine petdesetih pa do konca sedemdesetih let prejšnjega stoletja izboljšala z okoli 1 nT na 0,01 nT. To so omogočili magnetometri na precesijo protonov. Poleg ostalih zunanjih vplivov so s povečanjem merilne občutljivosti teh merilnih instrumentov postali vprašljivi predvsem: določevanja pozicije, določevanje smeri in nadzor nad vplivom zunanje temperature. Razvoj gradiometrov v osemdesetih letih prejšnjega stoletja je pospešil še problem šuma. Pri merjenju magnetnega gradienta s pomočjo letal so se namreč v nosilcu inducirali moteči električni tokovi zaradi njegovega gibanja v zemeljskem magnetnem polju.

V juliju leta 2008 je bil za Laboratorij za geomagnetizem in aeronomijo pri Visokošolskem središču Sežana (v nadaljevanju: LGA pri VSS Sežana) kupljen Overhouserjev protonski gradiometer GSM – 19GW s serijsko številko 7112566, izdelek podjetja GEM Systems iz Kanade. Njegove merilna občutljivost je 0,01 nT, merilna točnost $\pm 0,1$ nT in meri razpon od $15\mu\text{T}$ do $120\mu\text{T}$ (Overhouser Magnetometer / Gradiometer / VLF (GSM-19 v 7.0)). S tem instrumentom so bile v letu 2008 in 2009 opravljene prve popolne geomagnetne meritve na ponavljalnih točkah na ozemlju Republike Slovenije (Čop in Kocen, 2008). Ker so bile te meritve absolutne narave, je bilo potrebno preveriti merilne karakteristike navedenega kvantnega magnetometra.

Overhouserjev kvantni magnetometer

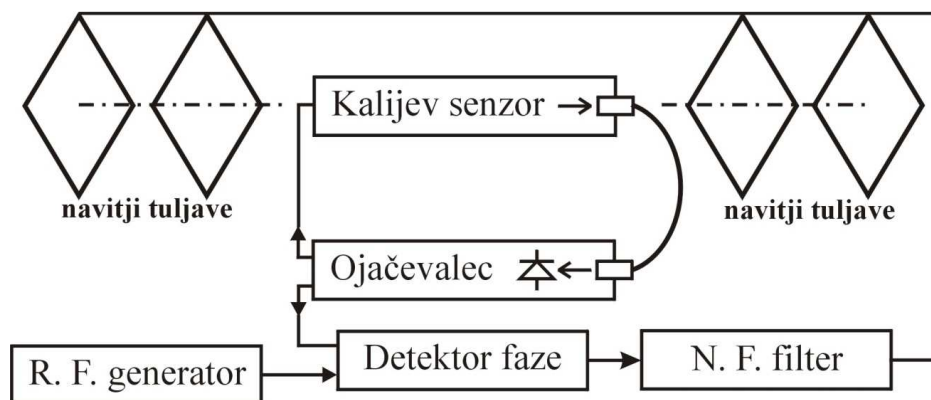
Kvantni magnetometri izkoriščajo magnetni spin atomskih delcev: protonov in neuparjenih valenčnih elektronov. Ker merijo velikost magnetnega polja ne glede na smer meritve, so to skalarni magnetometri ali magnetometri za absolutne meritve gostote magnetnega polja (Hrvoic in Hollyer). Te naprave merijo frekvenco magnetnega dipola

* Visokošolsko središče Sežana, Laboratorij za geomagnetizem in aeronomijo, Kraška ulica 2, 6210 Sežana

osnovnih delcev atoma pri njihovem prehodu iz nestabilnega na osnovni nivo ali pa frekvenco nestabilnega stanja nekaterih polariziranih paramagnetnih delcev atoma. Kvantni magnetometri se uporabljajo za geološke raziskave, pri odkrivanju naftnih nahajališč, v arheologiji, pri nadzoru okolja, odkrivanju orožja, granat in min, ter pri vseh drugih oblikah meritev gostote magnetnega polja. Med te meritve spadajo tudi meritve magnetnega polja Zemlje.

Priporočila za merjenje absolutne vrednosti magnetnega polja Zemlje na geomagnetnih observatorijih je sprejela mednarodna organizacija IAGA, The International Association of Geomagnetism and Aeronomy. Priporočena merilna točnost je $< 0,5$ nT in merilna občutljivost vsaj 0,1 nT (Jankowski in Sucksdorff, 1996; Korepanov, 2006). Tej zahtevi zadoščajo Overhauserjev magnetometer in magnetometri na optično vzbujanje. Med magnetometri na optično vzbujanje so najbolj razširjeni cezijevi in kalijeve magnetometri.

Pri Overhauserjevem magnetometru se vzbujanje prostih elektronov v posebni tekočini s prostimi neuparjenimi elektroni opravi z visokofrekvenčnim magnetnim poljem. Elektroni pri preskoku iz višjega vzbujenega stanja v normalno stanje oddajo energijo protonom. Prenos energije na protone spremeni način njihove magnetne polarizacije. Razmerje med frekvenco procesiranja protonov in gostoto zunanjega magnetnega polja je izredno linearno in neodvisno od temperature. Je le malo pod vplivom elektronov na orbiti vodikovega atoma, ki so skupaj z referenčno frekvenco edini izvor pogreškov tega magnetometra. Ker je vzbujanje elektronov narejeno z visokofrekvenčnim magnetnim poljem, je Overhauserjev magnetometer zelo primeren za merjenje enosmerne zemeljskega magnetnega polja v skoraj zveznem načinu merjenja do deset meritev na sekundo ali 10 Hz z merilno točnostjo $< 0,1$ nT (GSM-19 v 7.0 Instruction Manual, 2007). Pri tem pa porabi zelo malo energije v primerjavi z drugimi vrstami kvantnih magnetometrov.



Slika1: Blokovna shema sistema za regulacijo gostote magnetnega polja

Gradiometri se od magnetometrov razlikujejo po tem, da istočasno uporabljajo dva senzorja za merjenje magnetnega polja Zemlje. Postavitev teh senzorjev je lahko zelo raznolika in je odvisna od postavljenih zahtev. Navpična postavitev je najbolj običajna in tudi najbolj uporabna. Razlika v rezultatu meritve med dvema senzorjema, ki sta blizu skupaj, je za oddaljen izvor zanemarljivo majhna. Popačitve v magnetnem polju, ki jih povzročajo bližnji izvori, pa gradiometer zelo dobro izmeri (Breiner, 1999).

Opis merilnega sistema za primerjalno meritev skalarnih magnetometrov

Za preverjanje merilne točnosti skalarnih magnetometrov je potreben merilni sistem, ki uspešno ustvarja homogeno in časovno stabilno magnetno polje. Za ta namen je primeren sistem z regulacijo magnetnega polja. Ta je sestavljen iz merilnika magnetnega polja, referenčnega generatorja frekvence, primerjalnika faze in nizkofrekvenčnega filtra v povratni zanki (Slika 1). Za ustvarjanje magnetnega polja je potreben sistem tuljav, ki ustvarjajo homogeno magnetno polje v primerno velikem prostoru. V tem volumnu regulacijski sistem kompenzira vse magnetne gradiente zunanjih magnetnih polj. Leta 1994 je bil tak regulacijski sistem skupaj s sistemom tuljav postavljen na geomagnetnem observatoriju Institute Royal Meteorologique de Belgique – Centre de Physique du Globe a Dourbes, Viroinval (v nadaljevanju: RMI – CPG v Dourbesu v Belgiji).



Slika 2: Kalijev protonski magnetometer na optično vzbujanje z izotopom ^{39}K (desno) in merilna sonda Overhouserjevega protonskega magnetometra (levo) v homogenem polju sistema tuljav

Sistem tuljav je bil načrtovan tako, da se v njegovi notranjosti doseže homogeno magnetno polje (Rasson, 1996). Izbran je bil enotuljavni sistem, ki ga sestavljajo štiri navitja. Navitja so nameščena na nemagnetnih pravokotnih nosilcih s stranico dolžine 1,4 m. Njihova skupna magnetna os je postavljena v smeri glavnega zemeljskega magnetnega polja. Nosilna konstrukcija tuljave je robustna, lahka in omogoča natančno orientacijo v prostoru. Zato je pritrjena na nosilec, ki je po konstrukciji podoben nosilcu teodolitov in je nameščen na merilnem stebru v observatoriju. Taka konstrukcija sistema tuljav omogoča velik prihranek prostora, saj sta v sredini sistema tuljav nameščena tako merilni člen regulacije kot tudi senzor magnetometra, ki se ga primerjanja. Oblika prostora s senzorji je kubična s stranico 0,4 m (Slika 2). V tem prostoru je magnetno polje z največjim gradientom 0,1 nT/cm ali 10 nT/m pri gostoti magnetnega polja 50 μT . Enosmerni magnetilni tok, ki teče skozi tuljavo, se krmili s pomočjo močnostnih tranzistorjev, ki jih

krmili operacijski ojačevalnik s povratno zanko karakteristike PID. Tak sistem tuljav omogoča nadzor nad gostoto magnetnega polja v velikem območju frekvenc. Njegove induktivnosti in omske upornosti, kot tudi vsi ostali njegovi konstrukcijski parametri, vplivajo na stabilnost celotne regulacijske zanke.



Slika 3: Primerjalna meritev Overhauserjevega protonskega magnetometra v sistemu tuljav z regulacijo gostote magnetnega polja

Za merilni člen v regulacijski zanki je bil izbran kalijev optično vzbujen samostojno oscilirajoči magnetometer (Pazgalev, 1996). Razlogi za njegovo izbiro so njegove zelo ozke resonančne črte, kar je značilno za vse težje alkalne elemente. Uporabljena je le prva Zeemanova magnetna resonančna frekvenca kalija (Pieter Zeeman, 1865–1943; Zeeman je leta 1902 prejel Nobelovo nagrado za fiziko), ker je najbolj izrazita in ima širino spektralne črte od 3 do 6 Hz. Naslednji razlog za uporabo kalijevega magnetometra kot merilnega člena pa je veliko razmerje med signalom in šumom v zelo ozkem frekvenčnem pasu. Ta njegova lastnost omogoča merilno občutljivost $30 \text{ fT} = 30 \text{ femto T} = 30 \cdot 10^{-15} \text{ T}$ pri merilnem intervalu ene sekunde. Kalij je namreč najbolj primeren element za optično vzbujanje v primeru, ko se želi doseči visoka merilna občutljivost v krajšem časovnem razdobju pri še zadostni stabilnosti meritve (Alexandrov, 1996). Občasno se poleg magnetometra na izotop kalija 39 uporablja še magnetometer na izotop kalija 41 (MagTec Quantum Magnetometers), in sicer zato, da se preveri merilni člen in s tem tudi celotna regulacijska zanka. Žiromagnetna konstanta obeh izotopov kalija je namreč okoli 7 Hz/nT . Ob optičnem vzbujanju teh izotopov se pojavljajo za vsakega po štiri resonančne črte. Pri gostoti magnetnega polja nad $10 \mu\text{T}$ se jih da med seboj zelo dobro ločiti. Pri tem je kvadratna vrednost razpršenosti za oba izotopa $0,2 \text{ Hz}/\mu\text{T}^2$. To pomeni, da se jima pri gostoti magnetnega polja okoli $50 \mu\text{T}$ resonančni črti med seboj razlikujeta za 500 Hz. Za uporabljena kalijeva magnetometra je bilo izbrano kot normalno magnetno polje gostote $49 \mu\text{T}$ ali 345 kHz.

Ko je dosežena resonančna frekvenca samostojno oscilirajočega kalijevega magnetometra, je magnetno polje v sistemu tuljav nadzorovano z radiofrekvenčnim generatorjem. Detektor faze je dimenzioniran tako, da linearno množi dva visokofrekvenčna signala v območju od 0,1 do 0,8 MHz.

Karakteristika faze je osnovni problem celotnega sistema regulacije gostote magnetnega polja v prostoru, določenem s sistemom tuljav. Premik faze nastaja pri resonančni frekvenci magnetometra, povzročajo pa ga tudi ojačevalnik in radiofrekvenčna navitja v senzorju. Popolna kompenzacija faze je izvedena pri normalnem magnetnem polju. Kompenzacija faze je bila izvršena tudi na celotnem merilnem področju od 20 μ T do 80 μ T. Na obeh skrajnih robovih merilnega območja je bilo zaradi premika faze doseženo največje odstopanje frekvence $\pm 2,5$ H ali 350 pT. Stabilnost regulacijskega sistema v daljšem časovnem obdobju pa je znotraj reda 10 pT.

Rezultati preverjanja Overhouserjevega protonskega magnetometra

V času od četrta 28. oktobra do nedelje 1. novembra 2009 so bile na RMI – CPG v Dourbesu v Belgiji s pomočjo Jeana L. Rassona, direktorja inštituta, opravljene primerjalne meritve za Overhouserjev protonski gradiometer GSM – 19GW s serijsko številko 7112566 (Slika 3). Predhodno je bil preverjen morebiten vpliv obeh merilcev iz LGA pri VSS Sežana na magnetometer, nato pa še nahrbtnika za prenos merilnih sond. Na osnovi dveh zaporednih meritev gradienta na travniku pred servisno in absolutne hišo na observatoriju se je pojavil sum, da na meritve vplivajo tudi medsebojne razdalje med sondama in konzolo gradiometra. Zato je bila ponovljena druga meritev gradienta z večjo razdaljo med sondama in konzolo. Na osnovi dodatne meritve vpliva konzole gradiometra na senzor DI magnetometra je bilo ugotovljeno, da se ta vpliv zmanjša pod 1 nT na razdalji večji od 0,8 m. Poleg tega imajo različni deli konzole tudi različni magnetni vpliv, kar pomeni, da pri meritvi ni pomembna le zadostna medsebojna razdalja temveč so pomembni tudi medsebojni položaji posameznih delov gradiometra.

Merilna vrednost [nT]	Datoteka		Izmerjene vrednosti			Standardni odklon
	ime	velikost [KB]	maksimalna [nT]	minimalna [nT]	srednja [nT]	
20.000	033survey	68	20.000,10	19.990,78	19.995,52	2,198537998
30.000	032survey	56	29.998,41	29.989,27	29.995,93	1,815303575
31.000	031survey	60	30.997,20	30.976,93	30.992,42	4,864046912
40.000	030survey	50	40.000,71	40.000,63	40.000,68	0,019499869
45.000	029survey	98	45.000,33	45.000,26	45.000,29	0,012769464
50.000	025survey	60	50.000,00	49.999,92	49.999,95	0,013211662
60.000	026survey	46	59.999,24	59.999,13	59.999,16	0,017340021
70.000	027survey	60	69.998,48	69.998,41	69.998,45	0,016790500
78.000	028survey	88	77.997,88	77.997,80	77.997,85	0,012223964

Tabela 1: Primerjalna meritev Overhouserjevega magnetometra: senzor št. 73119

Rezultati primerjalnih meritev, opravljenih na merilnem sistemu za primerjalno meritev skalarnih magnetometrov na RMI – CPG v Dourbesu v Belgiji za Overhouserjev protonski gradiometer GSM – 19GW s serijsko številko 7112566 so podani v tabelah (Tabela 1, Tabela 2).

Merilna vrednost [nT]	Datoteka ime	velikost [KB]	Izmerjena vrednost			Standardni odklon
			maksimalna [nT]	minimalna [nT]	srednja [nT]	
20.000	034survey	45	19.998,16	19.988,89	19.995,25	2,053205722
30.000	035survey	81	29.995,88	29.953,58	29.989,51	7,035711041
40.000	036survey	75	40.000,55	40.000,44	40.000,48	0,022992270
50.000	037survey	50	50.000,07	50.000,03	50.000,05	0,010350983
60.000	038survey	37	59.999,61	59.999,53	59.999,55	0,013573291
70.000	039survey	38	69.999,14	69.998,99	69.999,11	0,023299949
78.000	040survey	79	77.998,78	77.998,57	77.998,75	0,024059905

Tabela 2: Primerjalna meritev Overhouserjevega magnetometra: senzor štev. 73120

Rezultati meritev dokazujejo visoko stopnjo ponovljivosti, pogreške v predpisanem razredu in enakost obeh merilnih sond. Dokazana je bila tudi pričakovana nižja merilna točnost absolutnega merilnega instrumenta pri gostoti magnetnega polja pod 40 μ T. Pri teh gostotah postane pri Overhouserjevem magnetometru že neugodno razmerje med signalom in šumom.

Po zaključku primerjalnih meritev je bilo potrebno na dveh merilnih stebrih v absolutni hiši geomagnetnega observatorija RMI – CPG v Dourbesu v Belgiji ugotoviti tudi vpliv medsebojnega položaja merilnih sond. Pomembna ni samo orientacija posamezne sonde pravokotno na smer zemeljskega magnetnega polja, temveč tudi njuna medsebojna lega ob rotaciji vzdolž njunih osi. V primeru zelo zahtevnih meritev je to razmerje položajev potrebno predhodno preveriti v magnetno čistem prostoru.

Zahvala

Za primerjalne meritve Overhouserjevega protonskega gradiometra GSM – 19GW s serijsko številko 7112566, opravljene od 28. oktobra do 1. novembra 2009 na RMI – CPG v Dourbesu v Belgiji, je bil del stroškov za enega merilca plačan iz projekta ARRS CRP-MIR-2007 številka M4-0225 z naslovom: Določitev magnetne deklinacije za območje Slovenije in primerjava z globalnimi modeli zemeljskega magnetnega polja. Projekt se je zaključil v decembru 2009. Institute RMI – CPG v Dourbesu v Belgiji pa je omogočil štiridnevno bivanje dveh merilcev LGA pri VSS Sežana na observatoriju v Belgiji in dal na razpolago vso potrebno opremo za izpeljavo primerjalnih meritev. Avtorja članka se zahvaljujeta vsem ustanovam kot tudi posameznikom, ki so jima omogočili primerjalno meritev in pomagali pri pripravi članka.

Literatura

- Alexandrov, E. B. et al. Double-resonance atomic magnetometers: from gas discharge to laser pumping. *Laser Physics*, 1996, vol. 6, no. 2, p.244-251.
- Breiner, Sheldon. *Applications Manual for Portable Magnetometers*. San Jose (CA, US): Geometrics, Inc, 1999.

- Csontos, Andras. et. at. 50 Years of History of the Tihany Geophysical Observatory. J. Reda, XII IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing Belsk, 19-24 June 2006. *Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, C (Geomagnetism)* -99 (398), 2007.
- Čop, Rudi in Kocen, Jernej. Geomagnetne meritve na geomagnetni referenčni točki na Predmeji. *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008*. Zbornik predavanj. 14. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 22. januarja 2009. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2009.
- GSM-19 v 7.0 Instruction Manual*. Manual Release 7.4. Richmond Hill (CAN): GEM Systems, Inc. Advanced Magnetometers, April 2007.
- Hrvoic, Ivan in Hollyer, M. Greg. *Brief Review of Quantum Magnetometers*. Markham (CAN): GEM Systems, Our World is Magnetic.
- Jankowski, J. in Sucksdorff, C. Use of the proton procession magnetometer to measure total intensity F. *IAGA Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice*. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 1996. ISBN: 0965068625.
- Korepanov, Valery. Geomagnetic Instrumentation for Repeat Station Survey. Edited by Jean L. Rasson and Todor Delipetrov. *Geomagnetics for Aeronautical Safety: A Case Study in and around the Balkans*. Editors Jean L. Rasson and Todor Delipetrov. 1 edition. Dordrecht (NL): Springer, 2006, str. 145-166. ISBN: 1402050240.
- MagTec Quantum Magnetometers*. MagTec is a research team working in [Ioffe Phys.-Tech. Institute \(Russian Academy of Science\)](#) and [S.I.Vavilov State Optical Institute](#), St.-Petersburg, Russia, specializing on ultra-precise quantum magnetometers. Dostopno na: <http://www.antver.net/magtec.html>.
- Nabighian, M. N. et al. 75th Anniversary. The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, November – December 2005, vol. 70, no. 6, p. 33-61.
- Overhouser Magnetometer / Gradiometer / VLF (GSM-19 v7.0)*. Richmond Hill (CAN): GEM Systems, Inc. Advanced Magnetometers.
- Pazgalev, S. Anatoly. Magnetic Full-Field Stabilizer Based on Potassium Optically Pumped Self-Oscillator. *Proceedings of the VIth Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing*. Scientific Editor: Jean L. Rasson, Responsible Editor: Dr. H. Malcorps. Bruxelles: Institut Royal Meteorologique de Belgique, 1996, p. 83-86.
- Rasson, L. Jean. Coil System for Magnetic Full Field Stabilizer. *Proceedings of the VIth Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing*. Scientific Editor: Jean L. Rasson, Responsible Editor: Dr. H. Malcorps. Bruxelles: Institut Royal Meteorologique de Belgique, 1996, p. 87-93.
- The Nobel Prize in Physics 1902* [online]. In recognition of the extraordinary service they rendered by their researches into the influence of magnetism upon radiation phenomena. Nobel Web AB 2009. Dostopno na: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1902/.