

# Stabilizacija magnetnega polja v 3D Helmholtz tuljavi

Samo Beguš, Martin Stanonik, Dušan Fefer

LPTAM, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: samo.begus@fe.uni-lj.si

## Magnetic field stabilization in a 3D Helmholtz air coil

To reduce the magnetic field of the Earth, 50 Hz electromagnetic interference and other magnetic disturbances when making precision magnetic measurements, we developed a system of the Helmholtz coils with an appropriate controller to compensate for the DC and AC magnetic field disturbances. The system generate an arbitrary magnetic field in any direction by a pre-defined program. The maximal amplitude is 0.1 mT in the vertical direction and 0.5 mT in the horizontal one.

### 1 Uvod

V prostoru se pojavljajo različne elektromagnetne motnje, katere je pri precizni kalibraciji magnetometrov potrebno odpraviti. Določene izvedbe magnetometrov (npr. optični magnetometri na pare alkalnih kovin, magnetometri s prosto precesijo) potrebujejo za delovanje ustrezno homogeno in časovno stabilno polje. Problematična so tako časovno malo spremenljiva magnetna polja, katerih tipičen predstavnik je zemeljsko magnetno polje, kot tudi hitro spremenljiva elektromagnetna polja elektroenergetskega omrežja, frekvence 50 Hz. Veliki magnetni vplivi nastanejo tudi zaradi premikov feromagnetnih objektov v bližini, na primer premikajoče se dvigalce v zgradbi.

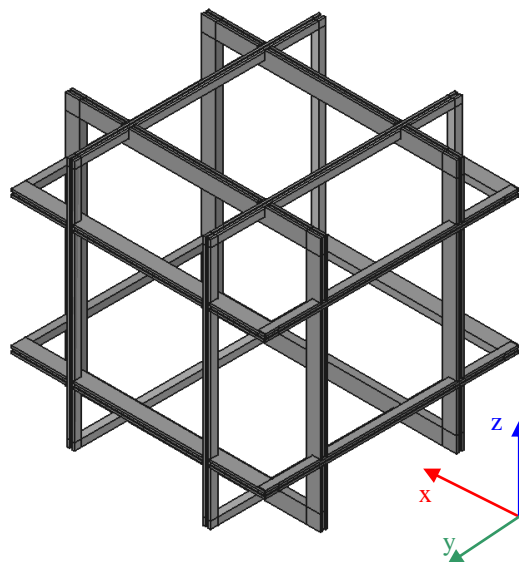
### 2 Kompenzacija magnetnega polja

Magnetne vplive okolice se lahko zmanjša s pomočjo zaščite iz materiala z visoko permeabilnostjo (npr. MuMetal), vendar je takšna zaščita zaradi visoke cene neprimerna za večje volumne.

Druga možnost pa je aktivno kompenziranje motečih magnetnih polj z zračnimi tuljavami. Iz matematične teorije večdimenzionalnih prostorov sledi, da poljuben vektor v tridimenzionalnem prostoru lahko zapišemo kot linearno kombinacijo treh med sabo paroma pravokotnih baznih vektorjev. Vektor gostote magnetnega pretoka  $\mathbf{B}$  torej lahko zapišemo kot linearno kombinacijo treh komponent v treh smereh kot prikazuje enačba 1.

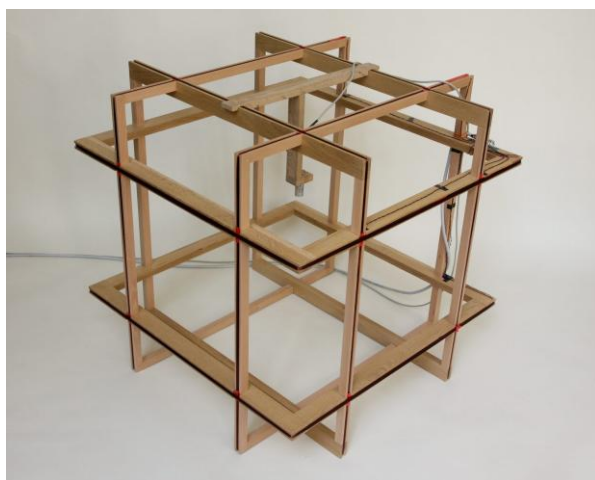
$$\vec{B} = B_x \cdot \vec{i} + B_y \cdot \vec{j} + B_z \cdot \vec{k} = \vec{B}_x + \vec{B}_y + \vec{B}_z \quad (1)$$

S pomočjo treh parov Helmholtzovih tuljav lahko kompenziramo vplive zunanjih magnetnih polj.



Slika 1: Skica sistema treh med seboj pravokotno nameščenih Helmholtz tuljav.

Slika 1 prikazuje skico sistema treh med seboj pravokotno nameščenih Helmholtz tuljav. Tuljave imajo obliko kvadrata, kar je bolj primerno kot krog, saj je območje homogenega polja tako tudi kvadratne oblike in s tem priložnejše za postavitev merjenih objektov na območje v središču tuljav s homogenim magnetnim poljem.



Slika 2: Fotografija 3D Helmholtzove tuljave za kompenzacijo in generiranje magnetnega polja

Tuljave so konstruirane na tak način, da kanali na lesenih tuljavnikih tvorijo tudi nosilno ogrodje, s čimer je bila dosežena minimalna teža in omogočena optimalna trdnost konstrukcije. Zunanje mere celotnega sistema tuljav so manjše od 0.892 m, optimalna razdalja med paroma tuljav pa je za faktor 0.5445 krajša od stranice [1, 2], to je 0.486 m. Sistem tuljav je tako lahko prenosljiv skozi vrata in s tem tudi mobilnen.

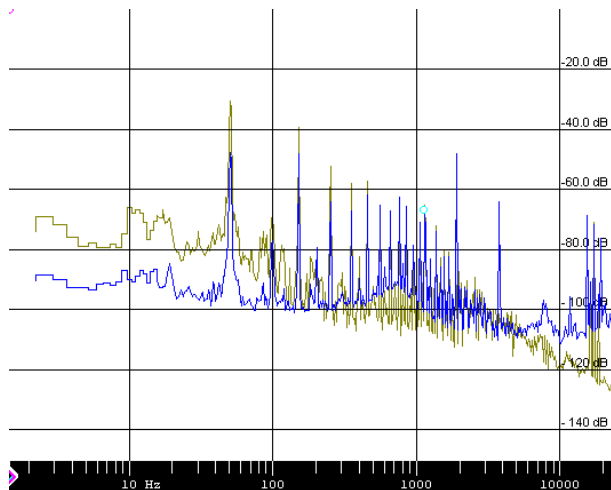
Sistem Helmholtzovih tuljav kompenzira zemeljsko magnetno polje v treh smereh: x, y in z, slika 1, Tuljave za kompenzacijo imajo po 10 ovojev. Dodatni tuljavi v navpični smeri pa 20 ovojev bakrene žice s premerom 1 mm. Fotografija sistema je prikazana na sliki 2.

Izven centra Helmholtzovih tuljav je nameščen troosni fluxgate magnetometer s katerim se meri, nastavlja in stabilizira magnetno polje. Kot referenčni magnetometer je tudi uporabljen troosni fluxgate magnetometer, ki se nahaja v centru Helmholtzovih tuljav.

### 3 Izvedba kompenzacije in rezultati

Za napajanje tuljav so bili uporabljeni tokovni viri, ki so podrobneje opisani v prispevku [3].

Vsaka tuljava Helmholtz para je krmiljena s svojim tokovnim virom. Tako je mogoče kompenzirati tudi manjše gradiente magnetnega polja. Tokovni viri so bili izvedeni s tranzistorji MJH6284 in MJH6287, ter operacijskim ojačevalnikom NE5534. Tokovni viri omogočajo ročno nastavljanje toka od -3 A do +3 A z vgrajenimi potenciometri.



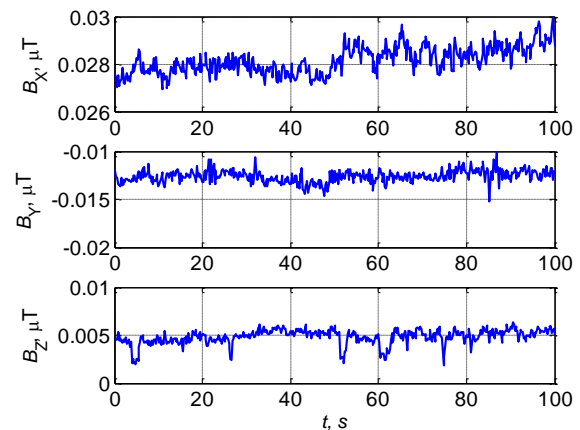
Slika 3: Zmanjšanje motenj v vertikalni smeri pri izključenih in vključenih kompenzaciji z analognim regulatorjem. Motnje pri frekvenci 50 Hz se zmanjša za faktor 10, to je za 20 dB.

Ročno nastavljanje toka se izvaja za vsak Helmholtzov par posebej. Nastavitve se opravi z dvema potenciometroma: prvi omogoča nastavitev amplitude magnetnega polja v posameznem paru Helmholtzovih tuljav. Drugi potenciometer omogoča izenačitev gradienta magnetnega polja v tej smeri – s tem potenciometrom torej simultano spreminjamo polje v obeh tuljavah, za toliko kot ga povečamo v eni, za toliko

ga v drugi zmanjšamo in obratno. Možno je tudi krmiljenje tokov tokovnih virov z enosmerno napetostjo. Občutljivost je 2 A/V.

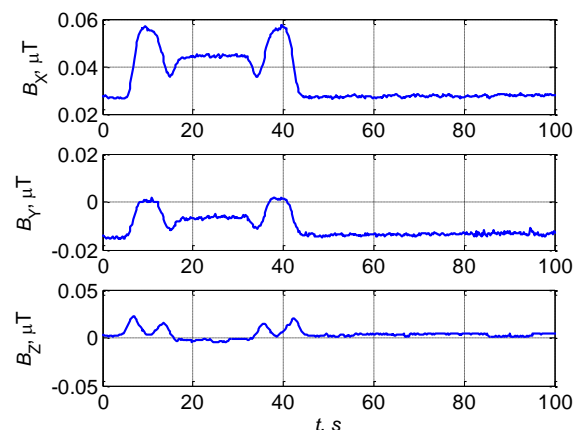
### 3.1 Kompensacija z analognim regulatorjem

Za avtomatsko kompenzacijo polj v X in Y smeri in regulacijo želenega polja v Z smeri smo zgradili analogni PI regulator. Z regulatorjem lahko dosežemo dušenje izmeničnega motilnega polja omrežne frekvence za faktor 10. Na sliki 6 je prikazan spekter magnetnega polja v Z smeri, izmerjen z fluxgate magnetometrom FL3-100 [4] in zvočno kartico EMU-TrackerPre [5]. Prikazan je spekter pri vključenih in izključenih regulaciji. Magnetno polje pri frekvenci 50 Hz se zmanjša za faktor 10, to je za 20 dB. Amplituda 0 dB na grafu ustreza gostoti magnetnega pretoka 2  $\mu\text{T}$ . Gostota magnetnega pretoka pri frekvenci 50 Hz se pri vključenih regulaciji zmanjša iz 0.3  $\mu\text{T}$  na 30 nT.



Slika 4: Magnetno polje v vseh treh smereh z vključenim analognim regulatorjem.

Na sliki 4 so prikazane vse tri komponente magnetnega polja z vključenim analognim regulatorjem v časovnem obdobju 100 s.



Slika 5: Magnetno polje v vseh treh smereh z vključenim analognim regulatorjem pri premikanju dvigala v neposredni bližini.

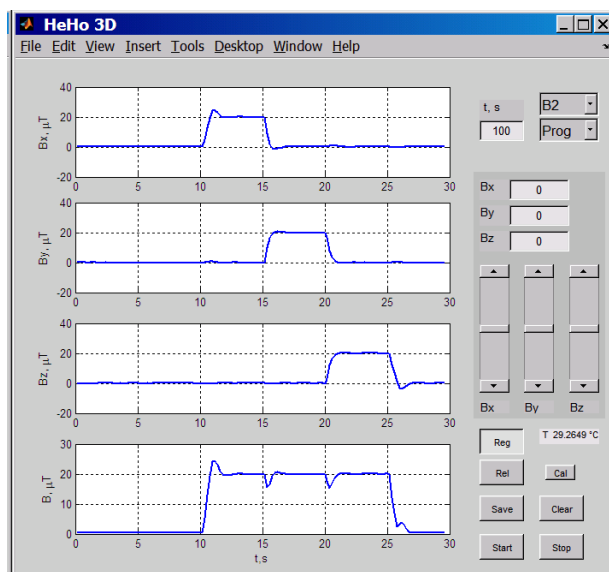
Slika 5 pa prikazuje vse tri komponente magnetnega polja z vključenim analognim regulatorjem v časovnem obdobju 100 s, med premikanjem dvigala v bližini.

Največja sprememba polja je 30 nT. Brez vključenega regulatorja je sprememba 0.5  $\mu\text{T}$ , slika 9.

### 3.2 Digitalna stabilizacija magnetnega polja

Magnetno polje v centru tuljave se lahko stabilizira tudi z povratnozanko digitalno stabilizacijo. Upravljanje sistema se izvaja s pomočjo programa MatLab in večkanalnega sistema za zajemanje signalov UEILogger 600 s 16 analognimi vhodi in 8 analognimi izhodi, ki krmilijo tokovne generatorje. Magnetno polje blizu centra tuljav se meri s troosnim fluxgate magnetometrom FL3-70 [5]. Šum magnetometra je, po podatkih proizvajalca, v frekvenčnem območju od 0.1 Hz do 10 Hz do 3 nT<sub>pp</sub>, razširjena merilna negotovost pa 2  $\mu\text{T}$ , pri merjeni gostoti magnetnega pretoka 50  $\mu\text{T}$ . Izmerjeno polje se primerja z nastavljeno zeleno vrednostjo in glede na razliko se nastavi izhodna napetost za krmiljenje tokovnih virov.

Izven centra Helmholtzovih tuljav je nameščen troosni fluxgate magnetometer s katerim se meri, nastavlja in stabilizira magnetno polje. Kot referenčni magnetometer je tudi uporabljen troosni fluxgate magnetometer, ki se nahaja v centru Helmholtzovih tuljav.



Slika 6: Kontrolna plošča.

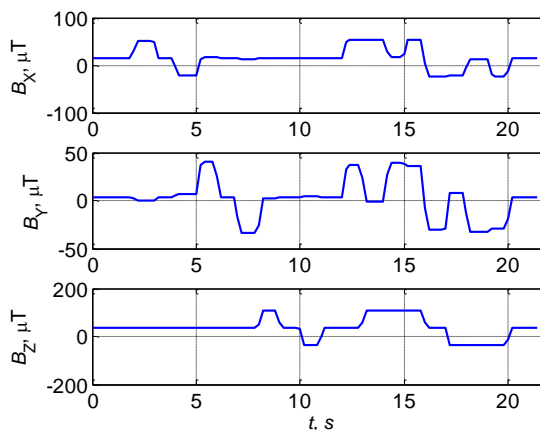
Kontrolna plošča je prikazana na sliki 6. Tipki **Start** in **Stop** služita za zagon in ustavitev celotnega sistema. Digitalno stabilizacijo se vključi in izključi s tipko **Reg**. S tipko **Clear** se briše izmerjene vrednosti na grafih. S tipko **Rel** se odšteje trenutna izmerjena vrednost magnetnega polja od prikazane na grafih. Željene izmerjene vrednosti se lahko shranijo v datoteko s tipko **Save**. Pred vklopom digitalne stabilizacije je potrebno izvršiti kalibracijo celotnega sistema s tipko **Cal**, da se ugotovi odstopanje osi in ojačanja fluxgate magnetometrov. Kot referenčni magnetometer je uporabljen troosni fluxgate magnetometer FL3-70, ki se

nahaja v centru Helmholtzovih tuljav in se ga po kalibraciji lahko odstrani.

Vrednosti napetosti za krmiljenje tokovnih virov in sam potek kalibracije v odvisnosti od časa je zapisan v tekstovni datoteki. Vsebina datoteke za kalibracijo pozicije in orientacije fluxgate senzorja:

t	Bx	By	Bz	t	Bx	By	Bz
1	0	0	0	11	0	0	0
2	-1	0	0	12	-1	-1	0
3	0	0	0	13	-1	0	-1
4	+1	0	0	14	0	-1	-1
5	0	-1	0	15	-1	-1	-1
6	0	0	0	16	+1	+1	0
7	0	+1	0	17	+1	0	+1
8	0	0	-1	18	0	+1	+1
9	0	0	0	19	+1	+1	+1
10	0	0	+1	20	0	0	0

Čas je v sekundah, izhodna napetost za krmiljenje tokovnega vir pa v V.



Slika 7: Izmerjeno magnetno polje med kalibracijo v X, Y in Z smeri.

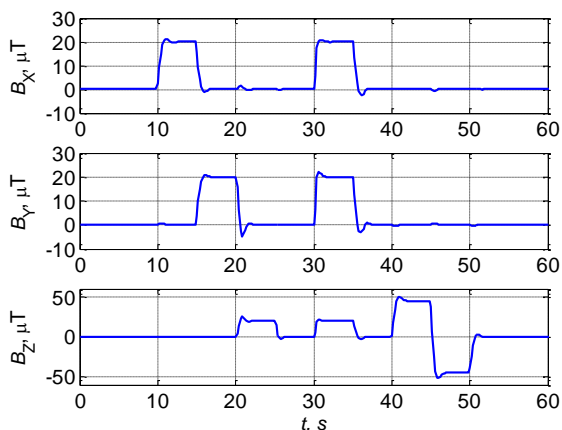
Na sliki 7 je prikazano izmerjeno magnetno polje med kalibracijo v X, Y in Z smeri.

Podobno kot za kalibracijo, so v tekstovni datoteki zapisane tudi vrednosti želenega magnetnega polja:

Čas	Bx	By	Bz
5	0	0	0
10	20	0	0
15	0	20	0
20	0	0	20
25	0	0	0
30	20	20	20
35	0	0	0
40	0	0	45
45	0	0	-45
50	0	0	0

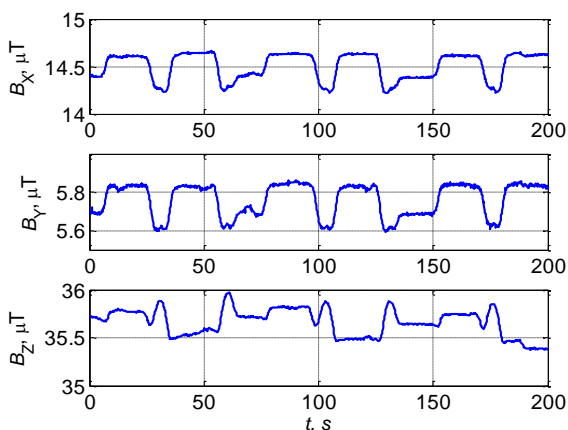
Čas je v sekundah, gostota magnetnega pretoka pa v  $\mu\text{T}$ .

Magnetno polje se lahko nastavlja tudi preko kontrolne plošče z vpisom vrednosti v polja označena  $B_x$ ,  $B_y$  in  $B_z$  oziroma s kontrolniki.

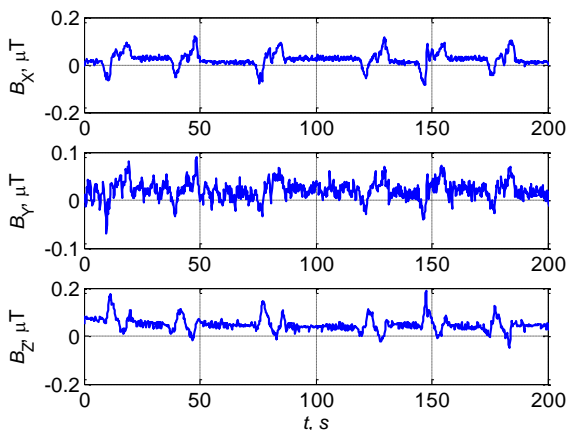


Slika 8: Generator poljubne amplitude in smeri polja. Željene amplitude se berejo iz datoteke. Vključena je digitalna stabilizacija polja ( $f_s = 5$  Hz).

Na sliki 8 je prikazan potek izmerjenega polja, ko so uporabljene vrednosti iz zapisa v datoteki.



Slika 9: Magnetno polje v vseh treh smereh brez digitalne stabilizacije pri premikanju dvigala v neposredni bližini.



Slika 10: Magnetno polje v vseh treh smereh z vključeno digitalno stabilizacijo pri premikanju dvigala v neposredni bližini.

Na slikah 9 in 10 pa so prikazane vse tri komponente izmerjenega polja pri premikanju dvigala v neposredni bližini z izključeno digitalno stabilizacijo, kjer je

največja sprememba  $0.5 \mu\text{T}$ , in pri vključeni digitalni stabilizaciji.

## 4 Zaključek

S trodimenzionalno Helmholtz tuljavo v obliki kocke je možno kompenzirati zunanja (motilna) magnetna polja in ustvariti poljubno gostoto magnetnega polja. Največje gostote magnetnega pretoka v posamezni smeri so prikazane v tabeli 1.

Tabela 1: Največje gostote magnetnega pretoka v posamezni smeri.

Magnetno polje v smeri	$B_{\max}$ , $\mu\text{T}$	$B_{\max}$ , $\mu\text{T}$
X	+90	-50
Y	+80	-50
Z	+130	-80

Z regulatorjem se lahko zadesi zunanje motnje omrežne frekvence do 10 krat in s tem omogoča delovanje magnetometra ter drugih naprav v magnetno nezaščiteni okolici. Z digitalno stabilizacijo magnetnega polja pa je možno kompenzirati počasne spremembe magnetnega polja in generirati gostoto magnetnega pretoka v poljubni smeri.

V nadaljevanju načrtujemo realizacijo kombinirane analogne regulacije z digitalnim krmiljenjem referenčnih vrednosti za analogne regulatorje. Pričakujemo, da bomo s takšno konfiguracijo še dodatno zmanjšali zunanje vplive na magnetno polje v sistemu Helmholtz tuljav.

Prispevek je nastal v sklopu raziskav programske skupine Metrologija in biometrični sistemi, ki jo financira ARRS.

Hvala Dragu Tacarju za fotografije sistema tuljav.

## Literatura

- [1] Rudd, M. Eugene and Craig, J. R., Optimum Spacing of Square and Circular Coil Pairs, Review of Scientific Instruments 39, 1372 (1968); DOI:10.1063/1.1683678
- [2] Thomas Tsz-Ka Li, Tri-axial Square Helmholtz coil for Neutron EDM Experiment, 2004  
[www.phy.cuhk.edu.hk/sure/comments\\_2004/thomasli.pdf](http://www.phy.cuhk.edu.hk/sure/comments_2004/thomasli.pdf)
- [3] Stanonik, Martin, Beguš, Samo, Fefer, Dušan. Nizkošumni tokovni vir. V: ZAJC, Baldomir (ur.), TROST, Andrej (ur.). Zbornik enaindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2012.
- [4] <http://www.stefan-mayer.com/FL3.htm>
- [5] <http://www.stefan-mayer.com/fle3.htm>