

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Přesné magnetické snímače a jejich aplikace

Učební texty k semináři

Autoři:

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc. (ČVUT Praha)

Ing. Antonín Platil, PhD. (ČVUT Praha)

Datum:

25. 6. 2010

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií CZ.1.07/2.3.00/09.0031

TENTO STUDIJNÍ MATERIÁL JE SPOLUFINANCOVÁN EVROPSKÝM SOCIÁLNÍM
FONDEM A STÁTNÍM ROZPOČTEM ČESKÉ REPUBLIKY

OBSAH

Obsah.....	1
1. Úvod.....	3
1.1. Rozsahy měřených polí a základní typy senzorů.....	3
1.2. Parametry magnetických senzorů.....	5
1.2.1. Rozsah, linearita, hystereze.....	5
1.2.2. Teplotní závislost citlivosti.....	5
1.2.3. Offset, jeho teplotní závislost a časová stabilita.....	5
1.2.4. Perming.....	5
1.2.5. Crossfield chyba.....	6
1.2.6. Šum.....	6
1.2.7. Další parametry.....	6
2. Základní typy magnetických senzorů.....	7
2.1. Hallovy senzory.....	7
2.1.1. Koncentrátory pole a neobvyklé geometrie.....	8
2.1.2. Inteligentní Hallovy senzory.....	9
2.2. AMR senzory a ostatní magnetorezistory.....	9
2.3. Fluxgate senzory.....	10
2.4. Rezonanční senzory.....	10
2.5. Indukční cívky.....	10
2.6. Ostatní senzory magnetického pole.....	11
3. Aplikace v lékařské technice.....	12
3.1. Magnetopneumografie.....	12
3.2. Měření objemu žaludku indukčními snímači.....	15
4. Ostatní aplikace.....	17
4.1. Detekce kovových předmětů, geofyzika.....	17
4.2. Navigace.....	17

4.3.	Měření polohy a vzdálenosti	17
4.4.	Měření elektrického proudu	17
4.5.	Další aplikace	18
	Seznam použité literatury	19

1. ÚVOD

P. Ripka

Tento text tvoří doplněk k powerpointové prezentaci. Hlavním jeho cílem je dát čtenářům k dispozici seznam užitečné literatury. Vzhledem k omezenému rozsahu pokrývá vlastní textová část podrobněji jen některé partie přednášky. Základní přehled o problematice magnetických senzorů a magnetometrů poskytnou knihy [Boll 1989] a [Ripka 2001] a články [Ripka 2008], [Edelstein 2007] a [Ripka 2010].

1.1. Rozsahy měřených polí a základní typy senzorů

Zemské pole:

celkem 50 μT ,

horizontální složka v našich zeměpisných šířkách 20 μT

vertikální 40 μT

Kompas:

1 deg \sim 350 nT ... udělá 17 m odchylku ve vzdálenosti 1 km

0.1 deg \sim 35 nT

Hledání nevybuchlé munice (UXO):

155 mm projektil 1.5 m hluboko ... 10 až 50 nT

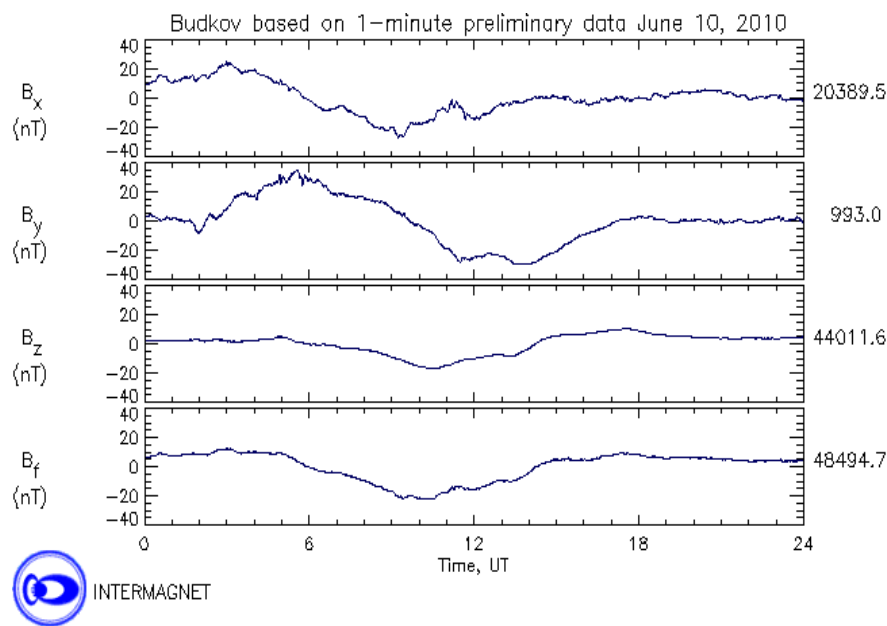
letecká bomba 6 m hluboko ... 1 až 5 nT

Požadavky na linearitu

1 nT v Zemském poli 50 000 nT \sim 20 ppm

Variace Zemského pole:

variační stanice v síti Intermagnet www.intermagnet.org



Obrázek 1.1 Denní záznam variací magnetického pole z laboratoře v Budkově. Směry x a y jsou v horizontální rovině, x je orientován na geografický Sever. Z je orientován dolů. B_f je totální pole.

Parametry staničních magnetometrů pro observatoře v síti Intermagnet

Vector Magnetometer

Resolution: 0.1 nT

Dynamic Range: 6000 nT

Band Pass: DC to 0.1 Hz

Sampling Rate: .2 Hz (5 sec)

Thermal Stability: .25 nT/°C

Long Term stability: 5 nT/year

Accuracy: ± 10 nT for 95% of Reported data

± 5 nT for Definitive data

Scalar Magnetometer

Resolution: 0.1 nT

Sampling Rate: 0.033 Hz (30 sec)

Accuracy: 1 nT

1.2. Parametry magnetických senzorů

Vedle běžných parametrů, které uvedeme jen pro úplnost, mají magnetické senzory některé parametry specifické. Ne vždy výrobci senzorů a autoři článků tyto parametry svých senzorů uvádějí.

1.2.1. *Rozsah, linearita, hystereze*

Běžné parametry, které se zdánlivě snadno změří v kalibračních cívkách. Je však třeba z okolí cívek odstranit všechny feromagnetické předměty, v případě střídavých měření všechny předměty elektricky vodivé. Vliv okolních rušivých polí a šumu měřicího proudu je možno potlačit použitím voltmetrů s dlouhou integrační dobou a synchronního měření kalibračního proudu i výstupu ověřovaného senzoru. Pozornost je třeba věnovat vlivu oteplení kalibrační cívky. Při masivním průměrkování je možno dosáhnout nejistoty 1 ppm při měření linearity přesných magnetometrů.

1.2.2. *Teplotní závislost citlivosti*

Vysoká teplotní závislost citlivosti samotného senzoru se velmi často snižuje použitím zpětnovazební cívky - tak je tomu např. u fluxgate senzorů. Výsledná teplotní závislost má pak typicky hodnotu 20 až 50 ppm/K, která je převážně daná teplotní roztažností použitých materiálů.

1.2.3. *Offset, jeho teplotní závislost a časová stabilita*

Pro tato měření je nezbytně potřeba kvalitní vícevrstvé magnetické stínění s nemagnetickým termostatem. Nejlepší fluxgate senzory dosahují stability offsetu 1 nT v širokém pásmu teplot, typická hodnota je ale 0,1 až 0,5 nT/K. Pro flikované AMR magnetorezistory je možno dosáhnout 10 nT/K.

1.2.4. *Perming*

Jedná se o změnu offsetu po vystavení senzoru silnému magnetickému poli. K tomuto efektu dochází u všech senzorů obsahujících feromagnetické materiály. Některé typy GMR magnetorezistorů nebo Wiegandových senzorů mohou být dokonce silným magnetickým polem zničeny.

1.2.5. *Crossfield chyba*

Je to nelineární závislost na pole ve směru kolmém k poli měřenému. Zatímco např. u fluxgate senzorů je toto parazitní parametr, který se vhodnou konstrukcí dá snížit na malé hodnoty [Ripka 2000] , u AMR magnetorezistorů je tato citlivost daná samotným principem senzoru a je třeba s ní počítat [Ripka 2009] .

1.2.6. *Šum*

Šum magnetických senzorů má většinou 1/f charakter a je ho vhodné vyjádřit výkonovou spektrální hustotou $P(f)$ na 1Hz. Zároveň je třeba udat, na jaké frekvenci začne mít senzor bílý šum. K měření šumu je nejlepší použít FFT spektrální analyzátor.

Pro 1/f šum platí $P(f) = P(1)/f$ [nT^2/Hz]

a pro jeho efektivní hodnotu v kmitočtovém pásmu (f_H, f_L) platí

$$N_{\text{rms}} = \sqrt{\int_{f_L}^{f_H} P(f) dt} = \sqrt{P(1) \ln(f_H/f_L)} .$$

Často se šum vyjadřuje jako \sqrt{P} v jednotkách nT/\sqrt{Hz} nebo pT/\sqrt{Hz} .

1.2.7. *Další parametry*

Důležitá je samozřejmě cena, odolnost proti vnějším vlivům a další parametry podobně jako u jiných senzorů.

2. ZÁKLADNÍ TYPY MAGNETICKÝCH SENZORŮ

P. Ripka

Většina magnetických senzorů jsou senzory vektorové, které měří složku magnetického pole v jednom směru. Pouze rezonanční senzory jsou skalárního typu, tj. měří absolutní velikost pole bez ohledu na jeho směr..

2.1. Hallovy senzory

Více než 90% vyráběných magnetických senzorů tvoří Hallovy sondy [Popovic 2004].

Použití Hallových senzorů je vhodné pro magnetické indukce vyšší než 1 mT, v rozsahu teplot cca -100°C až $+100^{\circ}\text{C}$ a pro frekvence od 0 do 30 kHz. Jsou používány zejména pro snímání polohy i rychlosti otáčení a bezkontaktní měření proudu. V automobilovém průmyslu jsou tyto senzory používány např. v systémech ABS, tachometrech či při řízení zapalování. Integrované Hallovy sondy jsou robustní, odolávají znečištění prostředí a jsou levné. Pro měření polí slabších než 1 mT nemusí již Hallův senzor vyhovovat. Vhodnější může být použití AMR senzorů případně při nejvyšších nárocích senzoru typu fluxgate.

Kromě křemíku se při výrobě Hallových senzorů používá i InSb, InAs, GaAs a další polovodiče. Tenkovrstvé InSb Hallovy senzory vyrábí technologií molekulární epitaxe např. firma Asahi Kasei. Výhodou těchto senzorů je díky vyšší elektronové mobilitě použitého materiálu asi pětkrát větší citlivost ve srovnání se senzory založenými na křemíku. Hlavní výhodou senzorů z InAs je jejich nízká teplotní závislost, pracovní rozsah převyšuje interval -40 až $+150^{\circ}\text{C}$ vyžadovaný pro automobilové aplikace. Zajímavá je miniaturní sonda vyráběná technologií silicon-on-insulator (SOI), která dosáhla šumu $1 \mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz při šířce 80 μm a tloušťce 50 nm [Haddab 2003].

Ještě nižších hodnot šumu ($100 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz) se dosahuje u GaAs senzorů založených na vícevrstvých heterostrukturách [Kerlain 2007].

Hallové senzory se obvykle napájejí z proudového zdroje. Ukazuje se ale, že použití napěťového napájení v některých případech vede k menší teplotní závislosti jejich citlivosti. Příkladem jsou tenkovrstvé InSb senzory: zatímco při napěťovém napájení je teplotní závislost Hallova napětí cca 1-2.0 %/deg., při napájením proudovým je závislost citlivosti jen 0.1 až 0.2 %/deg pro oblast pokojových teplot.

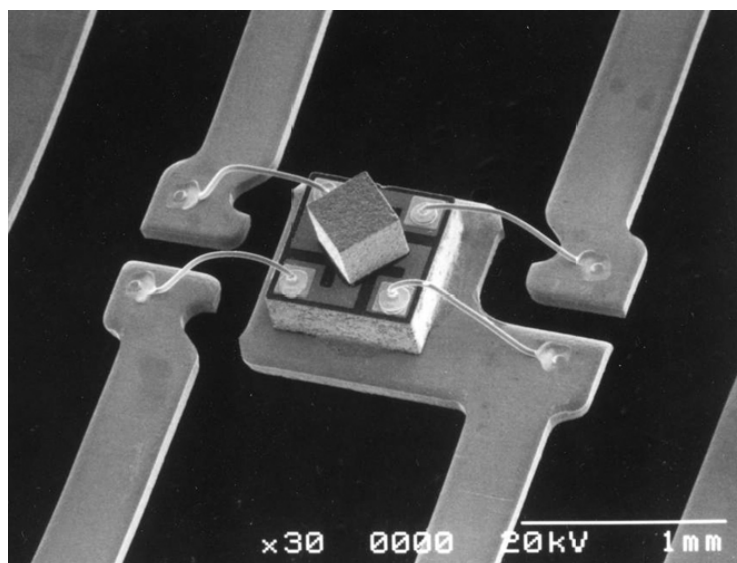
Největším problémem Hallové sondy je offset a jeho teplotní závislost. Offset může mít řadu příčin, např. malé chyby geometrie, nerovnoměrnost hustoty dotace, odpor kontaktů nebo mechanické napětí v kombinaci s piezorezistivním jevem. Při využití mikroelektronických technologií při výrobě Hallových sond bývá V_{off} menší než 0.1% napájecího napětí. To odpovídá v jednotkách magnetické indukce odpovídá typickým hodnotám $B_{\text{off}} \approx 10 \text{ mT}$, 1 mT a 0.1 mT pro Si, InGaAs a InSb Hallové sondy. Offset samozřejmě není stabilní, ale mění se s teplotou a časem. Vyloučíme-li všechny ostatní vlivy, zůstávají změny offsetu vyvolané šumem $1/f$. U velmi kvalitních senzorů odpovídají tyto změny hodnotám $B_{\text{off}} \approx 10 \mu\text{T}$. Teplotní koeficient citlivosti kvalitních Hallových senzorů je asi 0.1 %/K.

2.1.1. *Koncentrátory pole a neobvyklé geometrie*

Koncentrátory pole vyrobené z materiálu s vysokou permeabilitou zvyšují citlivost jakéhokoli magnetického senzoru. V současné době se integrují do pouzder některých Hallových senzorů a magnetorezistorů [Popovic 2006]. Mohou být také použity ke změně směru magnetického pole - tak se např. dá dosáhnout, aby Hallův sensor byl citlivý na pole v rovině čipu. Koncentrátory se používají i pro odstínění neaktivních GMR magnetorezistorů v můstku.

Úskalí koncentrátorů představuje jejich remanence, nelinearita, nebezpečí saturace a teplotní závislost jejich vlastností, zejména permeability. Je vhodné použít materiál s vysokou permeabilitou a zvolit takovou geometrii, aby výsledné zesílení magnetického pole bylo výrazně nižší, než permeabilita. Pak je zesílení výrazně méně teplotně závislé než permeabilita (je to analogické k použití záporné zpětné vazby v elektronice).

Neobvyklé geometrie Hallových senzorů zahrnují především sensor vertikální a válcový.



Obrázek 2.1 Hallův senzor s feritovým koncentrátorem pole
(Asahi Kasei Electronic řada HW)

2.1.2. *Inteligentní Hallovy senzory*

Hallovy sondy jsou vyráběny jako diskrétní součástky, technologie je ale CMOS kompatibilní. V poslední době je stále častější jejich integrace do inteligentních senzorů. To umožňuje optimalizaci pracovního bodu, kompenzaci teplotní závislosti, zesílení signálu a jeho převod do číslicové formy. Moderní Hallovy senzory pracují s číslicovým zpracováním signálu (DSP) a jsou programovatelné.

2.2. AMR senzory a ostatní magnetorezistory

Polovodičové magnetorezistory stále vyrábí firma Murata a používá je např. automobilka General motors.

Feromagnetické magnetorezistory byly původně vyvinuty pro čtecí hlavy harddisků. Nejčastěji se používají anizotropní magnetorezistory (AMR), které nacházejí použití např. pro měření polohy a rychlosti otáčení v automobilovém průmyslu a pro méně přesné kompasové hodinky a mobilních telefonů. Hlavní výhodou AMR senzorů ve srovnání s Hallovými senzory je vyšší citlivost a zejména mnohem stabilnější offset mj. pro absenci piezo efektů. Senzory GMR našly použití pro měření úhlové polohy. [Tumanski 2001].

AMR senzory jsou většinou vyráběné v můstkovém provedení. Je vhodné senzory periodicky flipovat, tj. měnit směr jejich magnetizace. Tím se mění znaménko jejich citlivosti a výstupní napětí je proto nutné zpracovávat synchronním detektorem. Flipování se snižuje perming a výrazně zlepšuje stabilita offsetu.

Značně vysoké hodnoty crossfield citlivosti u AMR senzorů lze efektivně potlačit použitím magnetické zpětné vazby (kompenzace měřeného magnetického pole). K tomu mají mnohé tyto senzory integrovánou zpětnovazební cívku.

Nejlepší AMR senzory dosahují šumu $200 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$.

2.3. Fluxgate senzory

Doposud jsou to nejpřesnější vektorové magnetické senzory. Jejich rozlišení je až 10 pT , dosahují linearity až jednotek ppm. Jejich slabinou je především teplotní závislost offsetu [Ripka 2003].

2.4. Rezonanční senzory

Používají se především tzv. protonové magnetometry precesního typu (založené na nukleární magnetické rezonanci), Overhauserovy magnetometry a magnetometry opticky buzené (např. Cesiové). Dosahované rozlišení je typ. $0,1 \text{ nT}$, rychlost 1 měření za sec., omezený rozsah (např. $20\,000$ až $100\,000 \text{ nT}$). Absolutní přesnost bývá 1 nT .

Laserem buzené vektorové rezonanční magnetometry typu SERF mohou dosahovat šumu až v řádu fT. Tyto senzory jsou ale ve stadiu laboratorního vývoje, a přestože jejich měřicí buňka je velmi malá, ke svému provozu potřebují celou řadu přesných přístrojů a značné energie [Allred 2002].

2.5. Indukční cívky

Rotační a vibrační cívky se dnes již nepoužívají. Stacionární cívky pochopitelně měří jen střídavá pole. Pro vyšší frekvence magnetického pole se používají cívky vzduchové. Optimální geometrie je krátká cívka s velkou plochou. Pro nízké

kmitočty, kde indukované napětí je nízké, se používají cívky s feromagnetickým jádrem. Optimální geometrie je štíhlý válec délky až 1 m. Jádra jsou feritová, z amorfních materiálů nebo méně často z permalloye [Tumanski 2004].

2.6. Ostatní senzory magnetického pole

SQUID senzory jsou nejcitlivějšími magnetickými senzory, měří ale jen změny pole. V praxi se používají jen jako gradiometry, většinou vyšších řádů. Vysokoteplotní SQUID pracují při teplotě kapalného dusíku, mají ale vysoký šum. [Clarke 2004, 2006].

Další typy senzorů jsou méně významné až exotické:

GMI (gigantická magnetoimpedance)

CMR (kolosální magnetorezistence)

magnetodiody a magnetotranzistory

magnetostrikční senzory

senzory založené na Lorentzově síle

magnetooptické senzory založené na Faradyaově jevu

3. APLIKACE V LÉKAŘSKÉ TECHNICE

A. Platil

Dvě konkrétní výzkumné aplikace ilustrují použití magnetických senzorů pro bio-medicínské účely. Magnetopneumografie za použití fluxgate senzorů má sloužit pro detekci zaprášení plic feromagnetickými částicemi. Indukční snímače vzdálenosti mají sloužit k odhadu objemu žaludku pro tzv. gastrickou stimulaci obézních pacientů.

3.1. Magnetopneumografie

Magnetopneumografie je neinvazivní diagnostická metoda navržená D. Cohenem [Cohen 1975], sloužící k měření zaprášení plic brusičů, svářečů apod. feromagnetickými částicemi. Po zmagnetování v silném stejnosměrném poli je subjekt vyšetřen citlivým magnetometrem a podle remanentního pole částic v plicích se usuzuje na jejich obsah a rozložení.

Původní Cohenův systém používal stíněnou místnost a SQUID magnetometr. Ačkoliv SQUIDy představují nejlepší dostupnou technologii měření slabých, např. biomagnetických polí (rozlišení řádu 1fT) [Clarke 2004], cílem našeho výzkumu je vyvinout mnohem levnější systém s fluxgate senzory.

Pro měření v zemském magnetickém poli (mimo mag. stínění) je výhodné používat gradiometrické uspořádání. Pole od vzdálených zdrojů je téměř homogenní a proto je v gradientním měření potlačeno. Naopak pole od blízkých zdrojů (zde částice v plicích pacientů) vykazuje silný gradient a představuje výraznou signaturu. Gradientní měření je poměrně obvyklé i u mnoha jiných typů senzorů (Hallowých sond, AMR/GMR, protonových, resp. Overhauserových magnetometrů a dokonce i u SQUIDů). Pro naše měření připadá do úvahy s ohledem na citlivost pouze SQUID nebo fluxgate.

Fluxgate sondy [Ripka 2003] použité pro měření mohou být mnoha různých konstrukčních typů s různými parciálními výhodami a slabinami. V našem systému jde vesměs o sondy ringcore (s prstencovým jádrem). Kromě toho se

Ize setkat se sondami typu racetrack (s oválným jádrem), rod-core (s tyčovým jádrem) atd.

Obvykle se fluxgate sondy typu ringcore vyznačují lepším šumem, stabilitou offsetu a lepším vyvážením (potlačením tzv. feedthrough, tj. nežádoucího přenosu budícího signálu transformátorovou vazbou na výstup). Trpí však nižší citlivostí v důsledku demagnetizace a ze stejného důvodu nežádoucí citlivostí na kolmé pole (cross-field). Sondy s podlouhlým jádrem (tyč) mají obvykle horší šum avšak díky tvaru netrpí demagnetizací a tím mají vyšší citlivost a odolávají kolmému poli.

Konstrukce s podlouhlým jádrem (ovál nebo tyč) jsou vhodné ke konstrukci kompaktních gradiometrů použitím diferenčního snímacího vinutí (dvě sekce snímací cívky antisériově na jednom jádře). Přesto obvykle konstrukce gradiometru s dvěma samostatnými senzory a následným odečtením signálu poskytují lepší výsledky (lepší stabilita). Obsáhlý popis gradiometrů je např. v [Merayo 2001].

V našem experimentálním systému je použit šestikanálový fluxgate magnetometer s analogovým zpracováním signálu. Gradient je určen výpočtem v software. Výkonová spektrální hustota šumu jednoho kanálu je asi $15\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1Hz. Při vzdálenosti jednotlivých sond 10 cm (tzv. baseline) to odpovídá šumu gradientu asi $350\text{pT}/\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1Hz.

Teoreticky by bylo ideální umístit sondy co nejbližší k sobě (bodové měření gradientu). Ve skutečnosti jsme omezeni konečně nízkou úrovní šumu obou sond, jejichž signál odečítáme. Kromě toho nelze zanedbat vzájemné ovlivňování sond polem každé z nich. (Sondy obvykle pracují ve zpětnovazebním režimu a vytvářené pole kompenzuje vnější pole v uzavřené smyčce. Výstupní veličinou je pak velikost kompenzačního proudu nutná pro vynulování pole v sondě. Tím je docíleno mnohem lepší linearity.)

Ačkoliv bylo v minulosti provedeno několik experimentů s digitalizací fluxgate magnetometru, stále platí, že nejlepších výsledků bylo dosaženo s plně analogovou elektronikou zpracování signálu (A/D převod je až na výstupu magnetometru). Digitální systém dosáhl šumu asi $1\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1Hz (srovnej $15\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1Hz u analogového systému).

Podobně současný vývoj alternativních senzorů (AMR) zatím nedosáhl potřebných parametrů. U AMR senzorů Philips KMZ51 bylo dosaženo šumu asi $3 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1\text{Hz}$ (opět srovnej výše).

Pro vyšetřování subjektů (a hlavně fyzických modelů z plastu nebo sádry s příměsí magnetitu) slouží stejnosměrný elektromagnet. S dostupným zdrojem lze vytvořit pole s maximální indukci asi 0.2 T. Krátce po zmagnetování je třeba provést skenování magnetického pole v síti bodů pomocí nemagnetického polohovacího lůžka. Bohužel rušivá pole v městském prostředí (zejména elektrická trakce, tj. tramvaje a metro) omezují použitelnou dobu měření na noční hodiny s přerušením dopravy (asi 1:00-4:00).

Konečným cílem je interpretace dat – tj. určení množství a rozložení magnetických částic v plicích. V našich experimentech pracujeme s diskrétním modelem plic s objemovými elementy tvořenými kostkami o hraně 2cm. Za předpokladu znalosti magnetických vlastností přítomných částic lze poměrně dobře odhadnout jejich celkové množství. Složitější je určit jejich prostorové rozložení. K těmto účelům byl vytvořen dopředný matematický model, který ze zadaných parametrů a umístění magnetických zdrojů podle Biot-Savartova zákona a principu superpozice spočte výsledné rozložení magnetického pole. Takovýto dopředný (forward) model slouží např. pro vytváření rozsáhlých trénovacích množin pro neuronové sítě a jiné experimentální metody výpočtu tzv. inverze pole (určení magnetických zdrojů z naměřeného pole).

V určitém případě lze takovýto dopředný model extrémně zjednodušit a (pro pevně danou geometrii měřicích bodů) redukovat ho na prosté maticové násobení vektoru zdrojů váhovou maticí. Výsledkem je vektor hodnot pole v prostoru. Takovýto model je výpočetně efektivní (rychlý) a může sloužit např. pro iterativní hledání „správného“ rozložení zdrojů podle naměřeného pole.

V inverzi pole bylo dosaženo některých dílčích úspěchů, avšak zdaleka se nejedná o vyřešený problém. Připomeňme, že se jedná o problematiku podobnou interpretaci geofyzikálních dat a zkoumání rudných ložisek na základě povrchových měření.

Další vývoj by měl směřovat mj. k detekci nanočástic, které pravděpodobně (na některých pracovištích) tvoří nezanedbatelnou část vdechovaného magnetického prachu. Klasická magnetopneumografie s použitím stejnosměrných magnetizačních polí a měřicích metod je vhodná pro detekci magnetických mikročástic. Menší nanočástice však mohou vykazovat tzv. superparamagnetické chování, tj. i při pokojové (resp. tělesné) teplotě hluboko pod Curieovou teplotou je vnitřní magnetizace částice natolik nestálá, že se chaoticky mění a navenek se částice jeví nemagnetická. (Přitom ji však lze zmagnetovat, nejedná se tedy o paramagnetismus.)

Detekce a měření takovýchto částic vyžaduje použití střídavých nebo pulsních metod měření. Určité experimenty v tomto směru byly již provedeny i na našem pracovišti. Bylo například možné s použitím fluxgate senzoru a za pomoci střídavého vnějšího magnetického pole detekovat malé množství (10mg) nanočástic magnetitu (resp. maghemitu). Pro experimenty byla použita tzv. kontrastní látka Endorem využívaná pro medicínské MRI zobrazování.

3.2. Měření objemu žaludku indukčními snímači

Dalším úkolem, který byl na našem pracovišti řešen byl vývoj systému pro měření objemu žaludku. V tomto případě se má jednat o součást terapeutického systému pro morbidně obézní pacienty, kde se přistupuje k úpravě režimu činnosti trávení elektrickou stimulací žaludku tzv. gastric pacemakerem. Takováto stimulace má být účinnější pokud se děje podle potřeby, tj. podle skutečného příjmu potravy a nikoliv trvale (což vede k vymizení účinnosti). Jelikož tělní prostředí vylučuje aplikaci většiny běžných (kontaktních) senzorů vzdálenosti, je nutno nalézt jiné řešení. Ultrazvukové snímání bylo zavrženo kvůli silné závislosti na konkrétním obsahu žaludku.

Nakonec bylo použito indukčních senzorů využívajících závislosti magnetické indukce (střídavého pole) na vzdálenosti zdroje. Snímač tvoří dvojice vysílací a snímací cívky umístěná na různých částech vnější žaludeční stěny. S rostoucí vzdáleností přijímače od vysílače klesá velikost pole a tím i velikost indukovaného napětí. Závislost je přitom dobře popsána a proto lze signál přepočítat na vzdálenost. Konstrukce vysílací i přijímací cívky je náročná

s ohledem na miniaturní rozměry ($< 1\text{cm}$), volbu biokompatibilních a dlouhodobě odolných materiálů a dokonalé zapouzdření.

Slabinou měření je fatální vliv nedodržení souososti (koaxiality) obou cívek. Pokles velikost pole pak může být způsoben nikoliv vzdáleností ale vychýlením (úhlovým nebo příčným) obou cívek. Chyba může snadno dosáhnout desítek procent.

Tento vliv je možné do značné míry omezit použitím tříosého systému kombinovaných snímacích cívek, kde v jednom miniaturním pouzdře snímáme složky x , y a z pole. Z naměřených kolmých složek lze spočítat celkovou velikost vektoru magnetického pole. Tento údaj je mnohem méně (i když stále značně) citlivý na chybu koaxiality cívek vysílače a přijímače. Lze předpokládat, že dalšího zlepšení by bylo možno dosáhnout použitím tříosé soustavy cívek také ve vysílači a např. frekvenčním nebo časovým multiplexem kanálů.

Provedené experimenty *in-vivo* (na laboratorních psech) potvrdily funkčnost systému snímání objemu žaludku.

4. OSTATNÍ APLIKACE

4.1. Detekce kovových předmětů, geofyzika

Pro detekci vodivých předmětů se používá detektorů na principu vířivých proudů. Dosah těchto senzorů je zhruba roven rozměrům detekční smyčky. Pro hledání hlubokých feromagnetických předmětů (např. nevybuchlých leteckých bomb) a archeologický průzkum se používá gradiometrů na principu fluxgate nebo dvojice rezonančních senzorů.

4.2. Navigace

Přesné magnetické senzory jsou doménou fluxgate senzorů. Pro jednoduché aplikace nebo při omezených rozměrech se používá i senzorů AMR, dosažitelná přesnost je 0,5° [Vcelak 2006].

4.3. Měření polohy a vzdálenosti

Na trhu dominují jednoduché spínače s permanentním magnetem osazené jazýčkovým kontaktem nebo Hallovým senzorem s dvoustavovým výstupem. Hallovy senzory a magnetorezistory se také používají pro měření otáček a úhlové polohy jako spolehlivější náhrada snímačů optických. Magnetické senzory polohy jsou v provedení inkrementálním i absolutním.

Speciální aplikací jsou magnetické trackery – snímače polohy v trojrozměrném prostoru. Bývají většinou založeny na principu indukčních cívek, které snímají magnetické pole z několika cívek buzených různými kmitočty.

4.4. Měření elektrického proudu

Používají se zejména Hallovy senzory a stále častěji i AMR. Pro měření velkých proudů se používá magnetooptických senzorů, pro velmi malé proudy SQUID [Ripka 2010].

4.5. Další aplikace

magnetické značky proti odcizení

detekce a rozpoznávání vozidel a ponorek

navádění střel

kosmický výzkum [Acuna 2002]

defektoskopie

...

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Acuna, MH: Space-based magnetometers, *Rev. Sci. Instrum.* 2002, Vol. 73, pp. 3717-3736

Allred J. C., R. N. Lyman, T. W. Kornack, and M. V. Romalis, High sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin-exchange relaxation,

Phys. Rev. Lett., vol. 89, pp. 130 801/1–130 801/4, 2002.

Boll, R., and K.J. Overshott (eds), *Magnetic Sensors, Sensors Vol. 2*, VCH Veiden, Germany, 1989.

Clarke J., A. I. Braginski, *The SQUID Handbook*, Wiley-VCH, Vol. 1 2004, Vol. 2. 2006

D. Cohen, Measurements of the magnetic fields produced by the human heart, brain and lungs, *IEEE Trans. Mag.*, Vol. MAG-11, No. 2 (Mar. 1975), 694-700

Edelstein A.: Advances in magnetometry, *J. Phys.: Condens Matter* 19 (2007), 165217 (28pp.)

Haddab, Y., Mosser V., Lysowec M., Suski J., Demeus L., Renaux C., Adriensen S., Flandre D.: Low-noise SOI Hall devices, *Proc. SPIE*. Vol. SPIE-5115, pp. 196-203. May 2003

Kerlain A., Mosser V., Low frequency noise suppression in III-V Hall magnetic microsystems with integrated switches, *Sensors Letters*, 192-195, 5, 2007

J.M.G. Merayo, et al., A portable single axis magnetic gradiometer, *Sens. Actuators A* 93 (2001), pp. 185–196.

Popovic, R.S., *Hall Effect Devices*, 2004 - Institute of Physics Pub

Popovic, RS Drljaca, PM Kejik, P: CMOS magnetic sensors with integrated ferromagnetic parts, *Sensors Act. A* 129 (2006), pp. 94-99

P. Ripka, W. Billingsley: Crossfield effect at fluxgate, Sensors and Actuators A 81 (2000), 176-179

Ripka P. (ed.): Magnetic Sensors and Magnetometers, Artech, Boston, 2001

Ripka P.: Advances in Fluxgate sensors, Sensors & Actuators A 106 (2003), 8-14

P. Ripka: Sensors based on bulk soft magnetic materials: advances and challenges, JMMM 320 (2008), pp. 2466-2473

P. Ripka, M. Janosek, M. Butta: Crossfield Sensitivity in AMR Sensors, IEEE Trans. Magn. 45 (2009), 4514 - 4517

Ripka P, Janosek M: Advances in Magnetic Field Sensors, IEEE Sens. J. 10 (2010) Issue: 6 , 1108-1116

Tumanski S, Thin film magnetoresistive sensors, IOP (2001) ISBN 075030702

Tumanski S.: Induction coil sensors, Measurement Sci Technol 18, 2007, R31-R46

Vcelak J., P. Ripka, A. Platil, J. Kubík and P. Kašpar: Errors of AMR compass and methods of their compensation, Sens Act.A129 (2006), pp 53-57

Výrobci

Aichi Micro Intelligent Corporation <http://www.aichi-mi.com>

NXP, dříve Philips Semiconductors www.nxp.com

Hitachi Metals Amerika, www.hitachimetals.com

<http://www.hitachimetals.com/product/sensors/gmr/gmr.cfm>

Honeywell www.honeywell.com. <http://www.ssec.honeywell.com>

Infineon www.infineon.com

Sensor-Applications for Your System Success, brochure, Siemens
Electromechanical Components

<http://www.siemens.de/ec/eccs/sensors/magnetic.htm>

Melexis <http://www.melexis.com/>

MXT Inc. (Melt extraction technology), Montreal, Canada
<http://www.mxt.ca/index.html>

Murata <http://www.murata.com/sensor/index.html>

Sentron www.sentron.ch

Sensitec www.sensitec.com

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a sensorických technologií
CZ.1.07/2.3.00/09.0031

Ústav automatizace a měřicí techniky
VUT v Brně
Kolejní 2906/4
612 00 Brno
Česká Republika

<http://www.crr.vutbr.cz>

info@crr.vutbr.cz