

Mirosław WOŁOSZYN
POLITECHNIKA GDAŃSKA

Kompensacja błędu kierunkowego magnetometru pompowanego optycznie

Dr inż. Mirosław WOŁOSZYN

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. W 1997 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Adiunkt w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki. Członek Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej. Specjalizuje się w pomiarach słabych pól magnetycznych oraz w projektowaniu i budowie magnetometrycznych systemów pomiarowych.



e-mail: mwołosz@ely.pg.gda.pl

Streszczenie

W pracy opisano zasadę działania magnetometru pompowanego optycznie. Opisano zależność dwóch błędów pomiarowych magnetometru od kąta, pomiędzy kierunkiem osi wzdluznej i poprzecznej czujnika magnetometru a kierunkiem wektora pola magnetycznego Ziemi. Opisano tzw. strefy martwe magnetometru oraz przedstawiono metodę doboru położenia czujnika magnetycznego względem wektora ziemskiego pola magnetycznego w celu zapewnienia poprawnej pracy magnetometru dla dowolnego kierunku wykonywania pomiarów. W pracy przedstawiono metodę kompensacji błędu kierunkowego magnetometru pompowanego optycznie, która pozwala na istotne zmniejszenie wpływu tego błędu na pomiary pola magnetycznego Ziemi na mobilnych platformach.

Słowa kluczowe: magnetometr pompowany optycznie, błąd kierunkowy, kompensacja.

Heading error compensation of optically pumped magnetometer

Abstract

The principle of operation of an optically pumped magnetometer is described in this paper. The dead zones and the dependence of two errors of the magnetometer on the magnetic flux density direction are presented. The method for compensation of the heading error of the optically pumped magnetometer is discussed in this paper. It allows essential reduction of this error influence on the magnetic flux density measurements on mobile rigs.

Keywords: compensation method, optically pumped magnetometer, heading error.

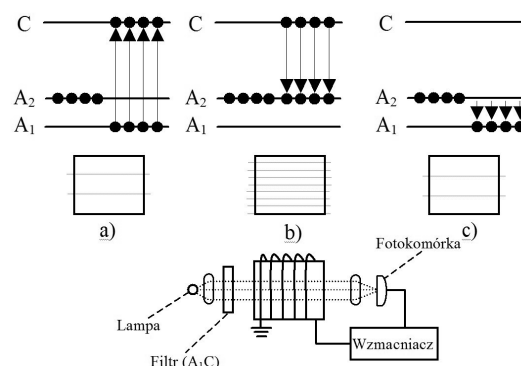
1. Wstęp

W pomiarach słabych pól magnetycznych stosowane są precyzyjne magnetometry skalarnie lub wektorowe (pole magnetyczne Ziemi wynosi od około 20 do 65 μT) [1]. W przypadku magnetometrów wektorowych stosowane są magnetometry magnetorezystancyjne GMR, transduktorowe oraz o najwyższej czułości magnetometry typu SQUID o czułości rzędu $10^{-13}\text{T/Hz}^{0.5}$. Magnetometry wektorowe pozwalają na pomiar trzech składowych wektora pola magnetycznego. Obecnie prowadzone są prace nad nową metodą magnetometrii wykorzystującą nieliniowy efekt Faraday'a z modulowaną amplitudowo wiązką światła [2]. Magnetometr ten pozwala na pomiar pola magnetycznego w zakresie 4 μT z czułością 4,3 $\text{pT/Hz}^{0.5}$. Zwiększenie zakresu pracy magnetometru pozwoli zastosować go również w pomiarach zaburzeń pola magnetycznego Ziemi. Stanie się on wówczas bardzo konkurencyjny w porównaniu z magnetometrami transduktorowymi. Magnetometry skalarnie mierzą moduł indukcji magnetycznej. Najczęściej stosowane są magnetometry pompowane optycznie na bazie cezu i potasu oraz protonowe. Najbardziej popularne są cezowe magnetometry pompowane optycznie o czułości $10^{-12}\text{T/Hz}^{0.5}$. Magneto-

metry te posiadają tzw. błąd kierunkowy, którego wartość zależy od kąta pomiędzy osią wzdluzną czujnika a kierunkiem wektora ziemskiego pola magnetycznego. Błąd ten może wynosić nawet do 1 nT, czyli może być o 3 rzędy większy niż czułość przyrządu. W pracy przedstawiono metodę minimalizującą błąd kierunkowy magnetometru pompowanego optycznie.

2. Zasada działania magnetometru pompowanego optycznie

W magnetometrach pompowanych optycznie wykorzystuje się zjawisko Zeeman'a [1, 3]. Magnetometr składa się z naczynia wypełnionego cezem, potasem lub helem, cewki otaczającej naczynie, źródła światła (lampa lub laser), soczewek, filtrów optycznych oraz fotokomórki (rys. 1). Zasada działania magnetometru w dużym uproszczeniu opiera się na zjawisku zmian współczynnika przepuszczania światła w zależności od stanu energetycznego atomów zastosowanego medium. Elektronów atomów medium przyjmują trzy stany energetyczne (A_1 , A_2 , C), w których elektrony pochłaniają energię świetlną lub nie (rys. 1). Medium dla dwóch stanów energetycznych ma różny współczynnik przepuszczania światła. Elektrony po pochłonięciu energii równej energii przejścia z poziomu A_1 do C (rys. 1a), przechodzą w niższy stan energetyczny (poziom A_2 – rys. 1b), w którym medium jest „przezroczyste” dla światła. Proces ten nazwany został pompowaniem optycznym. W fotokomórce prąd osiąga maksimum i wówczas blok sprzężenia zwrotnego wytwarza w cewce pole magnetyczne o częstotliwości $f = E/h$ (E – energia przejścia z poziomu A_1 i A_2 , h – stała Planck'a). Powoduje to przejście elektronów ponownie do poziomu energetycznego A_1 (rys. 1c), co sprawia, że medium ponownie wykazuje słabą przepuszczalność światła. Proces ten odbywa się z częstotliwością proporcjonalną do indukcji magnetycznej (dla cezu wynosi 3,498 nT/Hz). Magnetometry pompowane optycznie na bazie cezu charakteryzują się bardzo dużą czułością rzędu 1 pT i częstotliwością próbkowania do 100 Hz [4]. Do liderów producentów magnetometrów pompowanych optycznie należą firmy Geometrics, Scintrex i GEM.

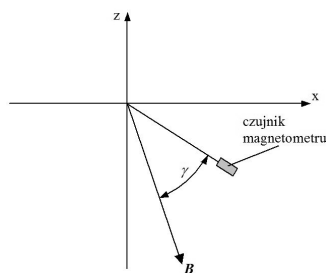


Rys. 1. Budowa i zasada działania magnetometru pompowanego optycznie
Fig. 1. Structure and principle of operation of an optically pumped magnetometer

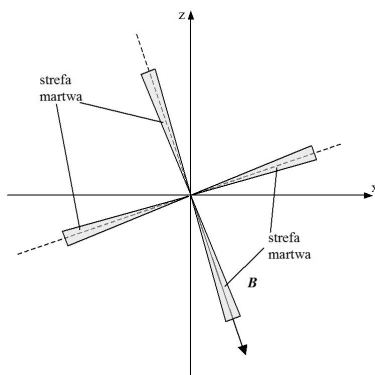
3. Błędy pomiarowe i strefy martwe magnetometru

Magnetometr pompowany optycznie charakteryzują dwa rodzaje błędów pomiarowych, które zależne są od kątów, jakie tworzą oś wzdluzna i poprzeczna czujnika z kierunkiem wektora pola magnetycznego Ziemi. Błąd kierunkowy (ang. heading error)

zależny jest od kąta pomiędzy kierunkiem osi wzdłużnej czujnika a kierunkiem wektora pola magnetycznego Ziemi i może osiągać wartość 1 nT. Drugi błąd (ang. spin error) zależny jest natomiast od kąta pomiędzy kierunkiem osi poprzecznej czujnika a kierunkiem wektora pola magnetycznego Ziemi i wynosi zwykle kilkadziesiąt pT. Wartości obu błędów pomiarowych uzależnione są głównie od precyzji wykonania części optycznej czujnika oraz zastosowanego medium [1]. Rezonans magneto-optyczny magnetometru występuje w ograniczonym zakresie kąta γ (rys. 2) między kierunkiem osi wzdłużnej czujnika a kierunkiem wektora pola magnetycznego Ziemi. Magnetometr ma tzw. strefę martwą (ang. dead zone), która występuje w otoczeniu kąta $\gamma \approx n \cdot \pi/2$ (liczba naturalna $n \in \langle 0, 3 \rangle$) między osią magnetometru a wektorem B (rys. 3).

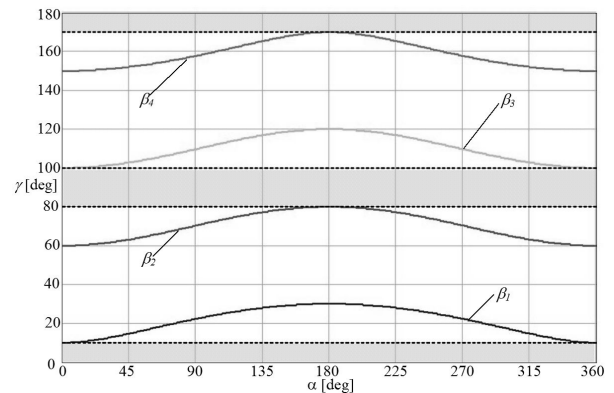


Rys. 2. Kąt γ między kierunkiem osi czujnika a kierunkiem indukcji magnetycznej B
Fig. 2. Angle γ between the sensor axis and the direction of the magnetic flux density B

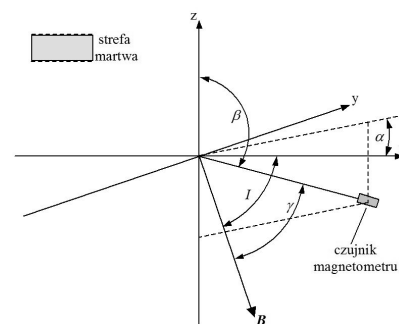


Rys. 3. Strefy martwe magnetometru pompowanego optycznie
Fig. 3. Dead zones of the optically pumped magnetometer

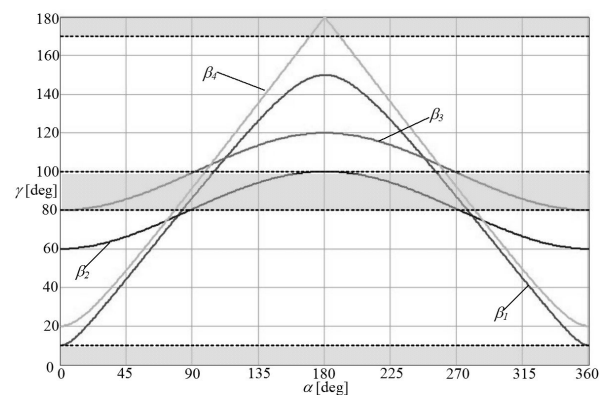
Strefa martwa magnetometru istotnie ogranicza możliwość wykonywania pomiarów pola magnetycznego w obszarach o różnej szerokości geograficznej kuli ziemskiej. W sytuacji, gdy magnetometr podczas wykonywania pomiarów przemieszczany jest w dowolnym kierunku, oś wzdłużna przyrządu musi być ustawiona optymalnie, aby zapewnić prawidłową pracę urządzenia i minimalny wpływ błędu kierunkowego na pomiar. Na rys. 4 przedstawiono zależność kąta γ magnetometru o przyjętej w pracy strefie martwej $\pm 10^\circ$ w obszarze o inklinacji magnetycznej $I = 80^\circ$, dla wybranych wartości kąta β pomiędzy kierunkiem osi wzdłużnej magnetometru a osią „z” (rys. 5). Dla inklinacji $I = 80^\circ$ istnieje stosunkowo szeroki zakres dopuszczalnych wartości kąta β . Optymalna wartość kąta β w sensie minimalnego wpływu błędu kierunkowego na pomiar dla dowolnego kierunku (kąt α) przemieszczania czujnika jest równa 180° . Jednak w rozpatrywanym przypadku inklinacji magnetycznej o wartości $I = 80^\circ$ wybór wartości kąta $\beta = 180^\circ$ jest niepraktyczny, gdyż każde minimalne odchylenie osi czujnika od kierunku pionowego powoduje przejście magnetometru do strefy martwej (dla strefy martwej $\pm 10^\circ$). Na rys. 6 przedstawiono zależność kąta γ magnetometru w obszarze o inklinacji magnetycznej $I = 10^\circ$, dla wybranych wartości kąta β pomiędzy kierunkiem osi wzdłużnej magnetometru a osią „z”.



Rys. 4. Zależność kąta γ magnetometru w obszarze o inklinacji magnetycznej $I = 80^\circ$ dla wybranych wartości kąta β ($\beta_1 = 160^\circ$, $\beta_2 = 110^\circ$, $\beta_3 = 70^\circ$, $\beta_4 = 20^\circ$)
Fig. 4. The dependence of γ angle in the area of magnetic inclination $I = 80^\circ$ for selected values of β angle ($\beta_1 = 160^\circ$, $\beta_2 = 110^\circ$, $\beta_3 = 70^\circ$, $\beta_4 = 20^\circ$)



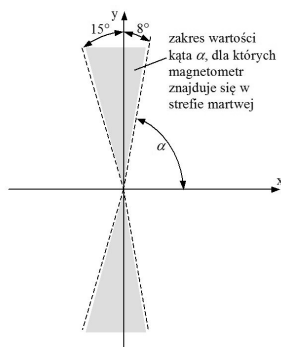
Rys. 5. Przyjęty układ współrzędnych dla kątów γ , β i α (I - inklinacja magnetyczna)
Fig. 5. The assumed system of coordinates for angles γ , β and α (I - magnetic inclination)



Rys. 6. Zależność kąta γ magnetometru w obszarze o inklinacji magnetycznej $I = 10^\circ$ dla wybranych wartości kąta β ($\beta_1 = 110^\circ$, $\beta_2 = 160^\circ$, $\beta_3 = 20^\circ$, $\beta_4 = 80^\circ$)
Fig. 6. The dependence of γ angle in the area of magnetic inclination $I = 10^\circ$ for selected values of β angle ($\beta_1 = 110^\circ$, $\beta_2 = 160^\circ$, $\beta_3 = 20^\circ$, $\beta_4 = 80^\circ$)

W pomiarach pola magnetycznego w obszarze o inklinacji magnetycznej $I = 10^\circ$ kierunek przemieszczania (kąt α) czujnika w płaszczyźnie poziomej ma ograniczony zakres. Na rys. 7 przedstawiono zakres dopuszczalnych wartości kąta α dla przyjętego kąta osi czujnika $\beta_1 = 110^\circ$ (rys. 5). Dla małych wartości inklinacji magnetycznej pomiarów pola magnetycznego Ziemi nie można wykonywać w dowolnych kierunkach. Stanowi to poważny problem np. w kompensacji zakłóceń magnetycznych generowanych przez samolot lub helikopter, na których zainstalowane są magnetometry [5, 6]. W metodzie kompensacji tych zakłóceń wymagane jest wykonanie pomiarów pola magnetycznego w 4 głównych kierunkach magnetycznych N-S, S-N, W-E i E-W, co w tym przypadku jest niemożliwe. Wybór wartości kąta β dla dowolnego

kierunku (dowolna wartość kąta α) jest bardzo ważnym czynnikiem ograniczającym wpływ błędu kierunkowego na pomiary.



Rys. 7. Zakres dopuszczalnych wartości kąta α dla przyjętego kąta osi czujnika $\beta_i = 110^\circ$ (rys.5)

Fig. 7. The range of acceptable values of α angle for the assumed sensor axis angle $\beta_i = 110^\circ$ (Fig.5)

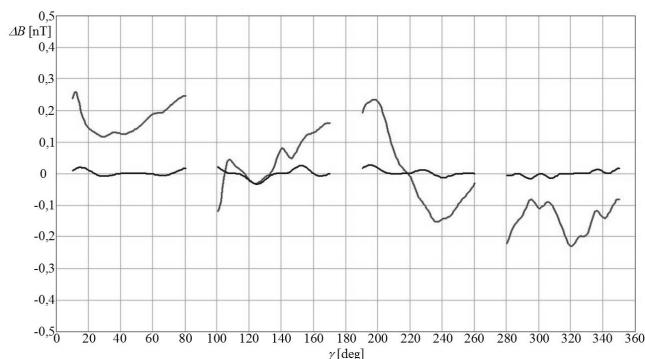
4. Metoda kompensacji błędu kierunkowego

Błąd kierunkowy magnetometru pompowanego optycznie związany z kierunkiem osi wzdłużnej czujnika względem kierunku wektora indukcji magnetycznej Ziemi, można zminimalizować stosując opracowaną przez autora metodę kompensacji. Metoda ta polega na wykonaniu pomiarów pola magnetycznego z zastosowaniem badanego magnetometru w celu wyznaczenia zależności błędu kierunkowego w funkcji kąta γ . Znając tę zależność oraz kąt pomiędzy osią czujnika a wektorem ziemskiego pola magnetycznego, można w sposób istotny ograniczyć wpływ błędu kierunkowego na pomiary. Wyznaczanie zależności błędu kierunkowego od kąta γ przeprowadzone powinny być w obszarze o minimalnych przemysłowych zakłóceniach magnetycznych (obszar niezabudowany w dużej odległości od elementów ferromagnetycznych) oraz w obszarze o dużej równomierności pola magnetycznego. Badania przeprowadzane są na amagnetycznym stanowisku pomiarowym. Stanowisko pomiarowe zbudowane jest z:

- elementów amagnetycznych, z obrotowym przyrządem pozwalającym na obrót czujnika magnetycznego w płaszczyźnie pionowej i poziomej w zakresie od 0° do 360° ,
- magnetometru o kierunkowej charakterystyce czułości (np. magnetometr magnetorezystancyjny),
- drugiego magnetometru pompowanego optycznie pracującego z badanym magnetometrem w układzie różnicowym,
- komputera.

Przyrząd obrotowy służy do zmiany kąta między kierunkiem osi wzdłużnej magnetometru a kierunkiem wektora ziemskiego pola magnetycznego. Drugi magnetometr pompowany optycznie o czułości nie mniejszej niż badany jest niezbędny do wyeliminowania z pomiarów zakłóceń związanych z wariacjami pola magnetycznego. Powolne (rzędu minut) wariacje ziemskiego pola magnetycznego wynoszą kilka nT, natomiast szybkie (rzędu kilku sekund) wynoszą kilkaset pT [7]. Ważnym elementem w metodzie kompensacji błędu kierunkowego magnetometru pompowanego optycznie jest magnetometr wektorowy. Magnetometr ten służy do pomiaru kąta między kierunkiem osi wzdłużnej magnetometru a kierunkiem wektora ziemskiego pola magnetycznego. W pracy zastosowano magnetometr firmy Honeywell HMR2300. Badany magnetometr pompowany optycznie ustawia się w ten sposób, aby rzut osi wzdłużnej czujnika na płaszczyznę poziomą był zgodny z kierunkiem magnetycznym N-S. Następnie obraca się czujnik w płaszczyźnie pionowej (zmiana kąta β w zakresie od 0° do 360°) i rejestruje zmierzoną indukcję w funkcji kąta γ (rys. 5). Następnie przeprowadzając interpolację za pomocą funkcji sklepanych zarejestrowanego sygnału, otrzymuje się analityczną zależność błędu kierunkowego w funkcji kąta γ . Na rys. 8 przedstawio-

no charakterystyki błędu kierunkowego w funkcji kąta γ przed i po kompensacji magnetometru pompowanego optycznie typu G823A firmy Geometrics [4].



Rys. 8. Zależność błędu kierunkowego w funkcji kąta γ przed i po kompensacji
Fig. 8. The dependence of the heading error on γ angle before and after compensation

Skuteczność opisanej metody zależy od:

- równomierności pola magnetycznego w miejscu badań;
- poziomu zakłóceń magnetycznych w miejscu badań (zmiany jakościowe i ilościowe powinny być jednakowe dla obu magnetometrów pompowanych optycznie);
- dokładności pomiaru deklinacji i inklinacji magnetycznej w miejscu badań;
- ortogonalności i czułości trzech osi magnetometru wektorowego.

5. Wnioski

Magnetometry pompowane optycznie charakteryzują się dużą czułością pomiarową rzędu $1 \text{ pT/Hz}^{0.5}$. Pomiary stacjonarne (czujnik nieruchomy) z zastosowaniem tego typu magnetometrów zapewniają wysoką czułość pomiaru na poziomie $\text{pT/Hz}^{0.5}$. W pomiarach pola magnetycznego z magnetometrami zainstalowanymi na mobilnych platformach (samolot, śmigłowiec, UAV), występują zakłócenia związane z tzw. błędem kierunkowym magnetometru. W pracy przedstawiono metodę kompensacji błędu kierunkowego magnetometru, która pozwala na istotne zmniejszenie wpływu błędu kierunkowego na pomiary pola magnetycznego Ziemi. Wadą metody jest konieczność stosowania w układzie pomiarowym magnetometru wektorowego oraz konieczność pomiaru inklinacji i deklinacji w badanym rejonie. Metoda ta pozwala również na łatwiejsze tzw. „parowanie” magnetometrów pracujących w układzie różnicowym.

6. Literatura

- [1] Ripka P.: Magnetic sensors and magnetometers. Artech House, Norwood 2001.
- [2] Gawlik W. i inni: Nowa metoda magnetometrii optycznej. Elektronika, 05/2008.
- [3] Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E.: Applied Geophysics. Cambridge University Press, New York 1990.
- [4] www.geometrics.com.
- [5] Clem T.: Superconducting magnetic sensors operating from a moving platform. IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 5(2), pp.2124-2148, 1995.
- [6] Leliak P.: Identification and Evaluation of Magnetic Field Sources of Magnetic Airborne Detector Equipped Aircraft. IRE Trans. Aerospace and Navigational Electronics, vol. 8, September 1961, pp. 95-105.
- [7] Merrill R., McElhinny M., McFadden: The magnetic field of the Earth. International Geophysics Series. Volume 63. Academic Press. San Diego, California, USA, 1998.