

**Mirosław WOŁOSZYN**POLITECHNIKA GDAŃSKA WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI  
G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk**Wektorowy gradiometr pola magnetycznego**

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: mwolosz@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono metodę wyznaczania parametrów wektorowego gradiometru magnetycznego mających istotny wpływ na przybliżony pomiar pochodnych cząstkowych. Wartości pochodnych cząstkowych mierzone są w sposób przybliżony metodą różnicową. Dokładność pomiaru różnicy indukcji magnetycznej zależy od kąta przesunięcia osi czujników magnetycznych, przesunięcia zera i współczynnika skali czujników oraz od odległości między czujnikami. Skuteczność wykrywania obiektów ferromagnetycznych z zastosowaniem wektorowego gradiometru bez informacji o wartościach tych parametrów jest bardzo niska.

**Słowa kluczowe:** gradiometr pola magnetycznego, pole magnetyczne, czujnik magnetyczny.

**Magnetic field vector gradiometer****Abstract**

Five independent partial derivatives of the magnetic flux density vector are used for detecting ferromagnetic objects by use of vector gradiometers in algorithms of object locating and identifying. This method requires precise measurement of the magnetic flux density gradient (1). A gradiometer built of magnetometers with directional sensitivity characteristics has several parameters, called critical in this paper, that influence the measurement of partial derivatives in a significant way. The gradiometer critical parameters are: angle between the axis of magnetic sensors, offset, accuracy of measurements of separate sensors and the distance between them. The critical parameters values can be determined on a basis of measurements from formulas (4-8). Partial derivatives (1) are determined on a basis of measuring the difference quotient of the magnetic flux density. When choosing the distance sensors, their sensitivity and approximation of partial derivatives by difference quotients should be taken into account.

**Keywords:** magnetic field gradiometer, magnetic field, magnetic sensor.

**1. Wstęp**

Metoda magnetometryczna należy do dziedziny nauki stosunkowo młodej, która ma zaledwie 100 lat. Stosowana jest w badaniach geologicznych, w systemach militarnych oraz w archeologii. Duży rozwój nauki w tej dziedzinie nastąpił głównie w latach 70-tych po pojawieniu się nowej technologii związanej z magnetometrami skalarnymi (magnetometry pompowane optycznie na bazie cezu, potasu i helu). W literaturze przedmiotu widać wyraźnie, że rozwój ten trwa nadal dzięki szybkiemu rozwojowi wysokiej technologii. Pojawienie się na rynku magnetometrów oraz gradiometrów SQUID o bardzo dużej czułości pozwoliło opracować nowe algorytmy lokalizacji i identyfikacji obiektów. Na uwagę zasługuje również dynamiczny rozwój technologii półprzewodnikowej, a w szczególności magnetometrów magnetorezystancyjnych. W literaturze poświęconej tej tematyce opisywane są głównie systemy, które zostały zbudowane na bazie nowoczesnych magnetometrów czy gradiometrów. Budowane są systemy z magnetometrami typu fluxgate [5, 6, 7] np. system MORPHEUS [6], z wyskokoczułymi magnetometrami i gradiometrami typu

SQUID [8, 9, 10] oraz magnetometrami i gradiometrami skalarnymi np. system MADOM [13], których czułość sięga już poniżej 1pT. Algorytmy lokalizacji i identyfikacji są ogólnie opisane w literaturze przedmiotu [1, 2, 3, 4]. W przypadku wykrywania obiektów z zastosowaniem gradiometrów wektorowych w algorytmach lokalizacji i identyfikacji obiektów korzysta się z pięciu niezależnych pochodnych cząstkowych wektora indukcji magnetycznej. Gradient wektora indukcji magnetycznej jest:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Korzystając z równań Maxwella:

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

z tensora gradientu otrzymuje się w rezultacie 5 niezależnych pochodnych cząstkowych, na podstawie których możliwa jest lokalizacja i identyfikacja obiektu. Metoda ta wymaga precyzyjnego pomiaru gradientu wektora indukcji magnetycznej. Najkorzystniejszym rozwiązaniem pod względem sprzętu jest gradiometr wykorzystujący zjawisko nadprzewodnictwa SQUID. Koszt takiego gradiometru jest na tyle duży, że wiele ośrodków badawczych skupia się na tańszych rozwiązaniach, bazujących na magnetometrach fluxgate. Rozwój technologii tych magnetometrów pozwolił osiągnąć ich czułość poniżej 10pT/Hz<sup>0.5</sup> [14]. Budowa gradiometrów o wysokiej czułości z zastosowaniem tych magnetometrów nie jest prostym zadaniem technicznym.

Problematyka związana z detekcją, lokalizacją i identyfikacją niebezpiecznych, ukrytych czy zamaskowanych obiektów o właściwościach ferromagnetycznych (miny kotwiczne, miny dryfujące itp.) jest aktualna i nabiera coraz większego znaczenia, szczególnie w obliczu narastającego zagrożenia terrorystycznego. Wykrywanie i eliminacja takich obiektów stanowi ważny element bezpieczeństwa kraju i wojsk własnych. W Polsce systemy magnetometryczne do detekcji obiektów ferromagnetycznych ukrytych pod wodą budowane są od wielu lat przez Centrum Morskiej Technologii Militarnych Politechniki Gdańskiej (CMTM) oraz Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Centrum Techniki Morskiej w Gdyni.

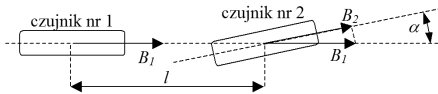
**2. Krytyczne parametry gradiometru**

Gradiometr zbudowany z magnetometrów o kierunkowej charakterystyce czułości ma kilka parametrów, nazwanych w pracy krytycznymi, które w sposób istotny wpływają na pomiar pochodnych cząstkowych. Krytyczne parametry gradiometru są następujące:

- kąt między osiami czujników magnetycznych (bardzo ważny parametr decydujący o szumach urządzenia podczas ruchu),
- przesunięcie zera (ang. offset) czujników magnetycznych,
- dokładność pomiarowa poszczególnych czujników,
- odległość między czujnikami.

Gradiometr wektorowy wymaga przede wszystkim zbadania parametrów metrologicznych poszczególnych czujników magnetycznych, wykonania amagnetycznej obudowy z możliwością precyzyjnego ustawiania położenia czujników oraz opracowania metody kalibracji gradiometru. Kalibracja w sposób zasadniczy decyduje o końcowej precyzji pomiarowej wektorowego gradiometru.

Głównym parametrem krytycznym gradiometru jest kąt między osiami czujników magnetycznych. W idealnym gradietrze kąt ten wynosi zero. W praktycznych rozwiązaniach możliwa jest minimalizacja tego kąta poprzez zastosowanie mechanicznej, precyzyjnej kalibracji osi czujników magnetycznych. Na rys. 1 pokazano dwa czujniki o osiach nierównoległych.

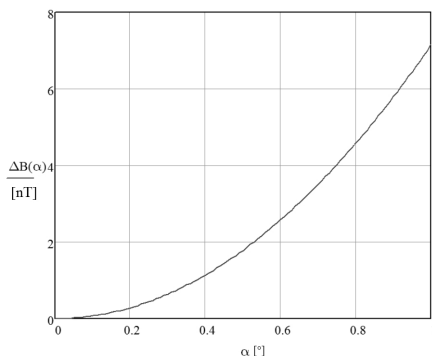


Rys. 1. Dwa czujniki magnetyczne o osiach nierównoległych  
Fig. 1. Two magnetic sensors with nonparallel axis

Brak współosiowości czujników magnetycznych wpływa istotnie na pomiar różnicy indukcji magnetycznej (4):

$$\Delta B = B_1 - B_2 = B_1(1 - \cos(\alpha)) \quad (4)$$

Na rys. 2 przedstawiono wpływ kąta  $\alpha$  przesunięcia osi czujników magnetycznych na pomiar różnicy składowej pionowej indukcji magnetycznej w równomiernym polu magnetycznym Ziemi.



Rys. 2. Wpływ kąta  $\alpha$  przesunięcia osi czujników magnetycznych na pomiar różnicy składowej pionowej indukcji magnetycznej w równomiernym polu magnetycznym Ziemi

Fig. 2. Influence of  $\alpha$  angle of magnetic sensor axis shift on measurement of a difference of the magnetic flux density vertical component in the Earth uniform magnetic field

Przesunięcie osi czujników o kąt równy jednemu stopniowi powoduje maksymalny błąd w pomiarze różnicy indukcji magnetycznej blisko 7 nT. Biorąc pod uwagę czułość magnetometrów transduktorowych na poziomie 5 pT, błąd ten może być ponad tysiącrotnie większy od czułości czujnika.

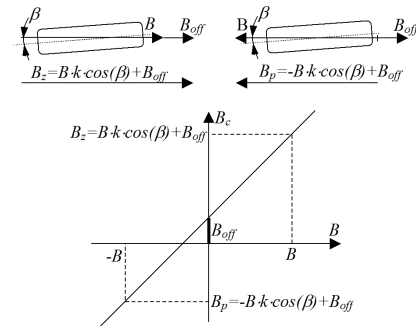
Kolejnym ważnym parametrem gradiometru jest przesunięcie zera w mierzonym sygnale. Wartości przesunięcia zera współczesnych magnetometrów transduktorowych wynoszą około  $\pm 5$  nT [14]. Wartość tego parametru można wyznaczyć na podstawie pomiarów przeprowadzonych w obszarze o dużej równomierności pola magnetycznego oraz niskich zakłóceniach magnetycznych lub na podstawie pomiarów przeprowadzonych w cewce solenoidalnej umieszczonej w ekranie magnetycznym. Po przeprowadzeniu pomiarów indukcji magnetycznej za pomocą czujnika o osi w przybliżeniu równoległej do linii sił pola magnetycznego (rys.3), zgodnie (5) i przeciwnie (6) do zwrotu indukcji magnetycznej, można obliczyć przesunięcie zera ze wzoru (7).

$$B_z = B \cdot k \cdot \cos(\beta) + B_{off} \quad (5)$$

$$B_p = -B \cdot k \cdot \cos(\beta) + B_{off} \quad (6)$$

$$B_{off} = \frac{B_z + B_p}{2} \quad (7)$$

gdzie:  $B$  – indukcja magnetyczna wewnątrz cewki solenoidalnej,  $B_z$  – zmierzona wartość indukcji magnetycznej dla czujnika w kierunku zgodnym ze zwrotem indukcji  $B$ ,  $B_p$  – zmierzona wartość indukcji magnetycznej dla czujnika w kierunku przeciwnym do zwrotu indukcji  $B$ ,  $B_{off}$  – przesunięcie zera czujnika,  $\beta$  – kąt między osią czujnika a osią cewki solenoidalnej,  $k$  – współczynnik skali czujnika.



Rys. 3. Metoda wyznaczania przesunięcia zera czujnika magnetycznego  
Fig. 3. Method for determining the sensor offset

Przesunięcie zera może być wyznaczone tą metodą nawet, jeżeli oś czujnika umieszczonego w cewce solenoidalnej znajdującej się w ekranie magnetycznym nie jest równoległa do osi cewki. Czujniki magnetyczne zastosowane do pomiaru różnicy składowej indukcji magnetycznej powinny być odpowiednio dobrane (spawowane), tak, aby wskazania obu czujników o osiach równoległych, w jednorodnym polu magnetycznym miały minimalną różnicę. Znając wartość przesunięcia zera czujnika można przeprowadzając pomiary w cewce solenoidalnej wyznaczyć jego współczynnik skali  $k$  dla  $n$ -różnych, znanych wartości kąta  $\beta$  ze wzoru:

$$k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{B_z(\beta_i) - B_p(\beta_i)}{2B} \quad (8)$$

Wyznaczone wartości współczynników skali czujników magnetycznych pozwalają na programowe „parowanie” czujników. Po zamontowaniu dwóch czujników na ramieniu o długości  $l$  należy wyznaczyć dodatkowo kąt  $\alpha$  (rys. 1). Dla poprawnie wyznaczonych parametrów dwóch czujników magnetycznych w cewce solenoidalnej umieszczonej w ekranie magnetycznym różnica indukcji magnetycznej równa jest w przybliżeniu zależności (4). Pozwala to na wyznaczenie kąta  $\alpha$ . Po wyznaczeniu parametrów krytycznych wektorowego gradiometru magnetycznego różnicę indukcji magnetycznej można obliczyć ze wzoru:

$$\Delta B = B \cdot k_1 + B_{1off} - (B \cdot k_2 + B_{2off}) \cdot \cos(\alpha) \quad (9)$$

Istotnym parametrem wektorowego gradiometru jest odległość  $l$  między czujnikami (rys. 1). Odległość ta nie może być zbyt mała z uwagi na ograniczoną czułość czujników. Dla dużych odległości gradiometru od wykrywanego obiektu wartość różnicy indukcji magnetycznej jest na poziomie lub poniżej szumów własnych czujników. Z drugiej strony odległość czujników nie powinna być zbyt duża z uwagi na przybliżony pomiar pochodnych cząstkowych indukcji magnetycznej, za pomocą ilorazów różnicowych. W celu porównania ilorazów różnicowych z poszczególnymi pochodnymi cząstkowymi w zależności od odległości między czujnikami, przeprowadzono komputerową analizę pola magnetycznego dla pocisku moździerzowego w pakiecie Opera 3D (rys. 4).

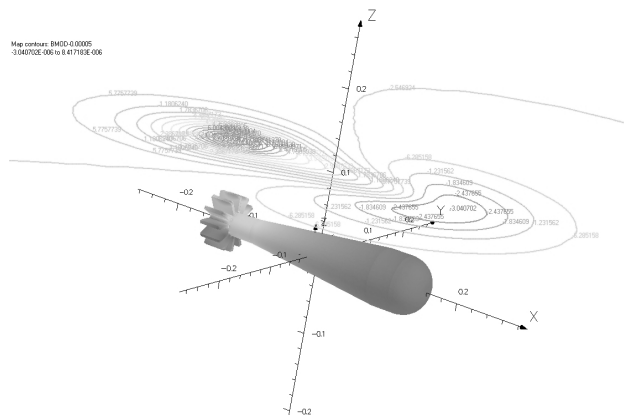
Wyniki analizy przedstawiono dla bezwymiarowej najmniejszej odległości gradiometru od obiektu ferromagnetycznego:

$$r_b = \frac{r}{L} \quad (10)$$

gdzie:  $r$  – najmniejsza odległość gradiometru od obiektu,  $L$  – długość obiektu, oraz dla bezwymiarowej odległości między czujnikami  $l_b$ :

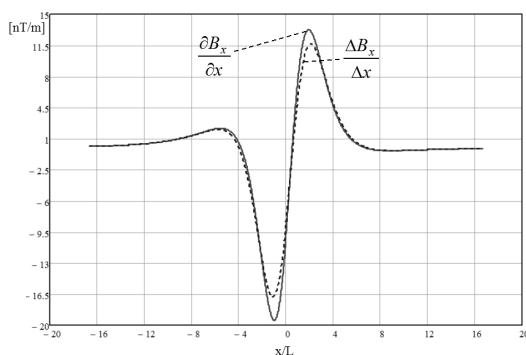
$$l_b = \frac{l}{L} \quad (11)$$

gdzie:  $l$  – odległość między czujnikami.

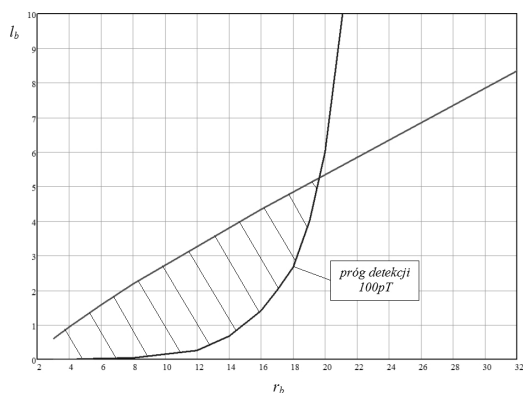


Rys. 4. Obiekt ferromagnetyczny przyjęty do analizy pola magnetycznego  
Fig. 4. The ferromagnetic object assumed for analysis of magnetic field

W analizie przyjęto dopuszczalny błąd między wartościami pochodnych cząstkowych indukcji magnetycznej a ilorazami różnicowymi na poziomie 5%. Na rys. 5 przedstawiono przykład rozkładu pochodnej cząstkowej  $\partial B_x / \partial x$  i ilorazu różnicowego  $\Delta B_x / \Delta x$  (gdzie:  $\Delta x = l$ ) indukcji magnetycznej obiektu wzdłuż bezwymiarowej osi  $x/L$  (dla  $r_b = 4$  i  $l_b = 2$ ).



Rys. 5. Rozkład pochodnej cząstkowej i ilorazu różnicowego indukcji magnetycznej wzdłuż bezwymiarowej osi  $x/L$  (dla  $r_b = 4$  i  $l_b = 2$ ,  $\Delta x = l$ )  
Fig. 5. Distribution of the partial derivative and difference quotient of the magnetic flux density along dimensionless axis  $x/L$  (for  $r_b = 4$  and  $l_b = 2$ ,  $\Delta x = l$ )



Rys. 6. Zależność bezwymiarowej odległości między czujnikami od bezwymiarowej najmniejszej odległości gradiometru od obiektu  
Fig. 6. Dependence of dimensionless distance between sensors on the dimensionless, smallest distance between the gradiometer and object

Indukcja magnetyczna obiektu oraz pochodne cząstkowe są złożoną funkcją kształtu, rozmiarów i kierunku obiektu względem wektora pola magnetycznego Ziemi oraz przenikalności względnej materiału i historii magnetycznej obiektu. Wyniki przeprowadzonej analizy są więc przybliżone. Na rys. 6 pokazano zależność bezwymiarowej odległości między czujnikami od bezwymiarowej najmniejszej odległości gradiometru od obiektu. Pomiarzy ilorazów różnicowych indukcji magnetycznej, które są w przybliżeniu równe pochodnym cząstkowym (błąd poniżej 5%), wymagają wyboru bezwymiarowej odległości czujników poniżej górnej krzywej na rys. 6. Przyjmując natomiast próg czułości gradiometru na poziomie np. 100 pT minimalną odległość  $l_b$  należy przyjąć powyżej dolnej krzywej (rys. 6). W poszukiwaniach obiektów ferromagnetycznych można określić przybliżone wartości  $r_b$  i  $l_b$ , co pozwala dobrać optymalną odległość między czujnikami.

### 3. Wnioski

W pracy opisano metodę wyznaczania parametrów wektorowego gradiometru magnetycznego mających istotny wpływ na przybliżony pomiar pochodnych cząstkowych oraz sposób określenia właściwych odległości między czujnikami w zależności od rozmiarów obiektu i jego odległości od gradiometru. Opisana metoda jest ważna w przypadku zastosowania w gradiometrze magnetometrów transduktorowych lub magnetorezystancyjnych.

### 4. Literatura

- [1] McFee J. E., Das Y., Ellingson R. O.: Locating and Identifying Compact Ferrous Objects. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, vol.28, no.2 march 1990.
- [2] Jia R., Groom R. W.: On Inversion of Gradient Magnetic Data for Detection of Multiple Buried Metallic Objectives.
- [3] Billings S., Pasion L., Oldenburg D.: Discrimination and Identification of UXO b Geophysical Inversion. Phase II: Inversion of Total-field Magnetics. Geophysical Inversion Facility. The University of British Columbia, Vancouver, V6T-1Z4, Canada, April 2002.
- [4] Wynn M.: Magnetic dipole localization using the gradient rate tensor measured by a five axis magnetic gradiometer with know velocity. SPIE Proceedings for Detection and Remediation Technologies for Mines and Mine-like Targets, Vol. 2496, p.357, 1995.
- [5] Salem A., Hamada T., Asahina J. K., Ushijima K.: Detection of unexploded ordnance (UXO) using marine magnetic gradiometer. Exploration Geophysics (2005), 36, 97-103.
- [6] Allen G., Purpura J., Overway D.: Measurement of Magnetic Noise Characteristics on Select AUVS with some Potential Mitigation Techiques. MTS/IEEE Oceans 2002, pp.978-984.
- [7] Wiegert R., Purpura J.: Magnetic Scalar Triangulation nad Ranging System for Autonomous Underwater Vehicle Based Detection, Localization and Classification of Magnetic Mines. MTS/IEEE Oceans 2004, pp.890-896.
- [8] Summey D. C., McCormick J. F., Carrol P. J.: Mobile Underwater Debris Survey System (MUDSS). Oceans 99, Marine Technologies Society and IEEE Oceanographic Engineering Society, Paper 2C3, September 1999.
- [9] Clem T.: Superconducting Magnetic Sensors Operating from a Moving Platform. IEEE Transaction on Applied Superconductivity, vol.5, pp. 2124-2128, no.2, June 1995.
- [10] Clem T., Overway D., Purpura J., Bono J., Koch R., Rozen J., Keefe G., Willen S., Mohling R.: High-Tc SQUID Gradiometer for Mobile Magnetic Anomaly Detection. IEEE Transaction on Applied Superconductivity, vol.11, pp. 871-875, no. 1, march 2001.
- [11] Overway D., Clem T., Bono J., Purpura J., Allen G.: Evaluation of Polatomic P-2000 Laser Pumped He-4 Magnetometr/Gradiometer. MTS/IEEE Oceans 2002, pp.952-960.
- [12] Nelson H., McDonald J.: Multisensor Towed Array Detection System for UXO Detection. IEEE Transaction on Geoscience and Remote sensing, vol.39, pp.1139-1145, no.6, June 2001.
- [13] Socum R., Kuhlman G., Ryan L., King D.: Polatomic Advances in Magnetic Detection. MTS/IEEE Oceans 2002, pp.945-951.
- [14] www.bartington.com

otrzymano / received: 28.09.2011

przyjęto do druku / accepted: 02.11.2011

artykuł recenzowany