

УДК 623.98

МАГНИТОЛОКАЦИЯ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПОИСКА ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2015 г. Б. А. Нерсесов¹, М. С. Афанасьев², Э. И. Карабашева¹¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва
e-mail: nba1940@yandex.ru²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
e-mail: michaela2005@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.03.2012 г., после доработки 25.11.2013 г.

Проанализированы теоретические аспекты создания третьего поколения поисковых магнитометров – средств пассивной локации. Разработаны практические рекомендации по оценке точностных характеристик магнитолокационных систем. Приведены данные технологии создания и технические характеристики новых твердотельных датчиков морских магнитолокаторов на основе микроразмерных гетероструктур.

DOI: 10.7868/S0030157415020124

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие средств морской магнитометрии требует расширения функциональных возможностей магнитометрических средств (ММС) за счет повышения порядка измеряемого параметра магнитного поля: скаляр, вектор, градиент первого порядка, тензор второго порядка (табл. 1).

Отметим, что целевыми функциями магнитометра, использующего два пространственно-расположенных датчика магнитного поля (ДМП), являются не только обнаружение (фиксация объекта в зоне поиска), но и пеленгация (определение направления на обнаруженный объект). В настоящее время почти все эксплуатируемые ММС второго поколения имеют конструкцию магнитогradientометра. Причем наиболее приемлемым вариантом gradientометра является расположение двух датчиков в одном буксируемом контейнере (на жесткой базе 1–2 м).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МАГНИТОЛОКАЦИИ

В 80–90-е годы XX века отечественными и зарубежными специалистами была начата разработка научных основ создания третьего поколения магнитометрических систем – пассивных локаторов ферромагнитных объектов с использованием сложной системы пространственно-распределенных датчиков магнитного поля (МП).

В основу алгоритмов магнитной локации объекта положен метод решения обратной задачи магнитостатики – определение направления \mathbf{g} и модуля радиуса – вектора \mathbf{R} , а также величины дипольного магнитного момента – M .

Программное же обеспечение методов магнитолокации дипольного источника предполагает повышение порядка измеряемого параметра МП от скаляра и вектора до тензора gradientа магнитной индукции \mathbf{B} , компонентами которого яв-

Таблица 1. Основные тенденции развития средств морской магнитометрии

Функции ММС	Изменяемый параметр МП	Тип датчика МП
Обнаружение	Ортогональные составляющие вектора, модуль вектора	Трехкомпонентный датчик, модульный датчик
Пеленгация	Градиент первого порядка, радиус-вектор	Система двух трехкомпонентных датчиков (gradientометр)
Локация	Тензор второго порядка, модуль вектора магнитного момента	Система девяти gradientометрических датчиков

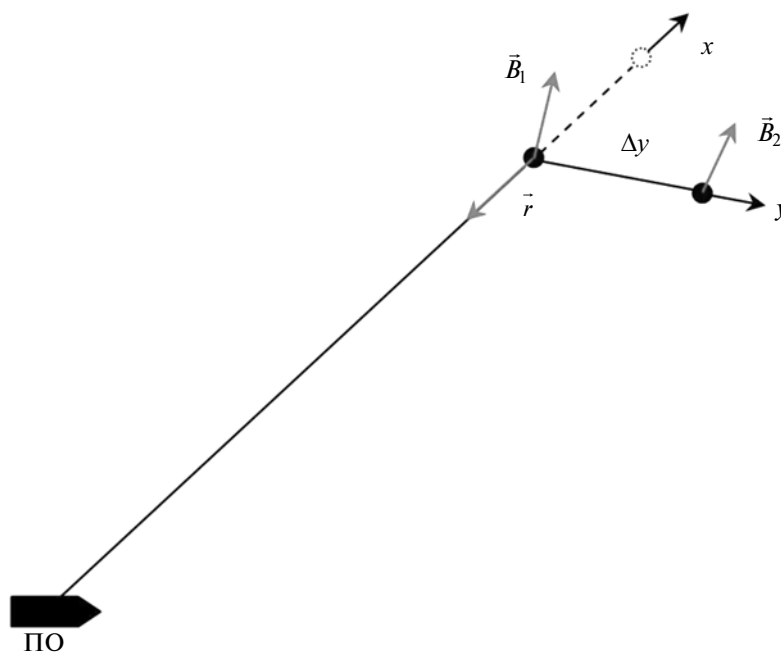


Рис. 1. Векторные соотношения характеристик магнитного поля диполя в режиме пеленгации.

ляются пространственные производные вектора индукции:

$$D = \begin{vmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \vec{B}}{\partial x} & \frac{\partial \vec{B}}{\partial y} & \frac{\partial \vec{B}}{\partial z} \end{vmatrix}.$$

Установлено [5, 6], что, магнитометрическая система, состоящая из системы датчиков девяти пространственных градиентов магнитного поля и измеряющей тензор 2-го порядка, позволяет определить радиус-вектор \mathbf{R} , проходящий через точку наблюдения на обнаруженный объект, а также модуль M его магнитного момента, а также определить координаты подводного объекта (ПО).

Первое решение обратной задачи магнитометрии методом определения корней полинома шестой степени по данным измерения тензора D было получено У. Вином в 1975 году. Однако данное решение имело два принципиальных недостатка. Оно не было однозначным и инвариантным.

Поэтому в 1980 г. Семеновым [5] были разработаны новые методы обработки информации на основе теоремы Эйлера для однородных функций. Для дипольного источника были получены следующие соотношения:

$$\vec{R} = -3D^{-1} \times \vec{B}.$$

Кроме того, было показано, что тензор D симметричен т.е.:

$$\frac{\partial B_i}{\partial j} = \frac{\partial B_j}{\partial i} (i, j = x, y)$$

и не имеет следа, т.е.

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0.$$

Эти выводы позволили значительно упростить алгоритм определения тензора, поскольку из девяти компонент тензора D независимыми являются только пять:

$$\frac{\partial B_z}{\partial x}, \frac{\partial B_z}{\partial y}, \frac{\partial B_z}{\partial z}, \frac{\partial B_x}{\partial y}, \frac{\partial B_y}{\partial y}.$$

Однако решение обратной задачи при условии информации только об элементах тензора D неоднозначно. Условием однозначного решения является дополнительная информация о составляющих вектора \mathbf{B} .

При пеленгации используется магнитоградиентометр (продольный или поперечный), состоящий из двух магнитометров с фиксированной (жесткой или гибкой) базой (рис. 1).

В режиме локации алгоритм определения местоположения дипольного объекта по постоянному МП (при его дипольной аппроксимации) предполагает измерение трех компонент вектора индукции, а также пяти его независимых пространственных производных, что позволит опре-

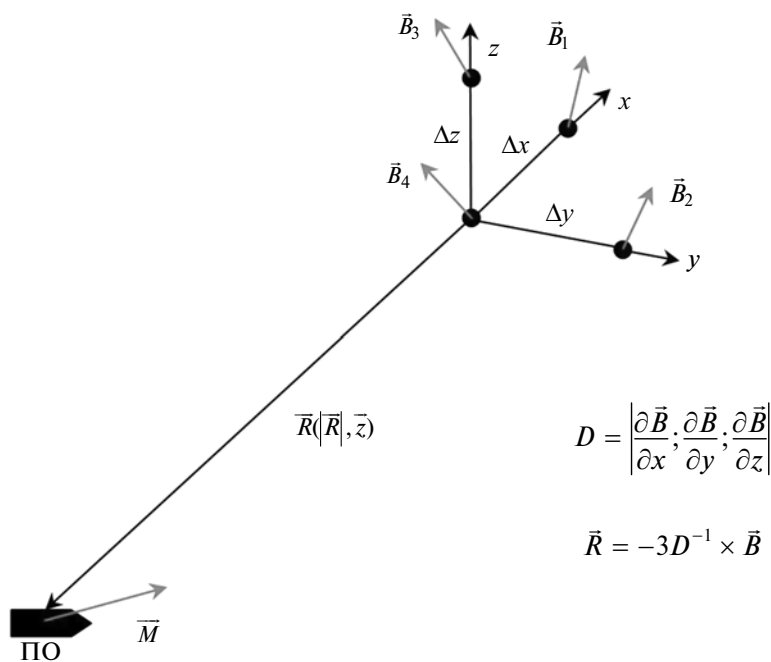


Рис. 2. Векторные соотношения характеристик магнитного поля диполя в режиме локации.

делить дальность (модуль радиуса-вектора) и величину магнитного момента ПО (рис. 2).

Как следует из [4, 6], весьма критичным является выбор расстояний между датчиками МП – базы измерительной системы, поскольку их увеличение снижает точность вычисления пространственных производных и помехоустойчивость системы в целом. Кроме того, значительной технической проблемой при большой измерительной базе является необходимость обеспечения ее жесткости.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Практическая реализация процедуры определения параметров дипольных объектов МП ставит задачу получения оценок точностных характеристик измерительных систем с учетом не только устойчивости алгоритмов, но и аппаратных шумов и ошибок всех элементов системы, в первую очередь входного аналогового тракта.

Теоретические и экспериментальные исследования [1, 4, 6], позволили выявить главные источники ошибок, приводящих к погрешностям оценивания параметров R и M : собственные шумы датчиков, асимметрия и разбаланс градиентометров, помехи и дифракционные искажения структуры поля источника МП.

Установлено [1], что наиболее весомый вклад в общую ошибку дает разбаланс градиентометров. Ошибки оценки величины магнитного момента ПО примерно в 6 раз превышают ошибки оценки

радиуса-вектора. Так, для определения расстояния до объекта, имеющего магнитный момент 0.1 А м^2 , с точностью 10% разбаланс градиентометров (при базе 0.1 м) должен быть не хуже 10.

Актуальность измерения пространственных производных МП с малой базой стимулировала создание градиентометров на основе микроразмерных технологий.

Особое внимание при разработке магнитолокатора должно также уделяться технологии создания миниатюрного датчика как базового элемента тензорной ММС.

В табл. 2 приведены характеристики протонного (штатного) и сегнетоэлектрического (разработанного) датчиков. Их сравнительная оценка показывает перспективность использования миниатюрных датчиков в разрабатываемых магнитолокаторах.

Датчики на основе ферроэлектрических материалов представляют собой микроструктуру из пленок пьезоэлектрического (сегнетоэлектрического) (ПЭ) материала и магниточувствительного материала, обладающего магнитострикционными (МС) свойствами [1, 2]. Магнитоэлектрический эффект (МЭ) возникает как результат произведения свойств отдельных слоев, составляющих структуру.

Принцип действия ДМП на основе МЭ показан на рис. 3а, и 3б. При приложении к структуре внешнего магнитного поля H возникает магнитострикция, что приводит к деформации пьезоэлектрических слоев. В результате этого ПЭ слои поляризуются и на их поверхностях генерируется элек-

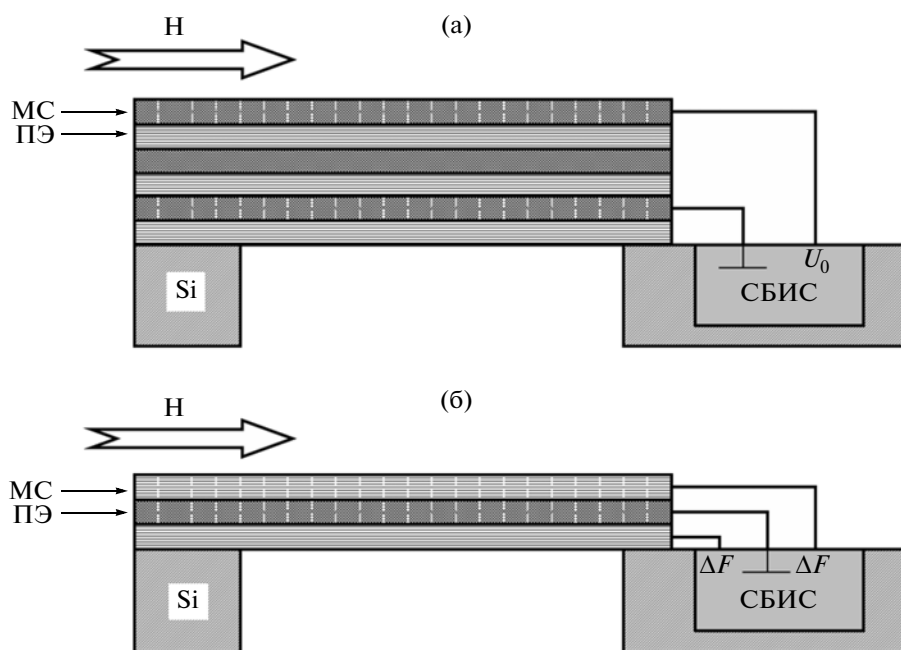


Рис. 3. Принцип действия ДМП на основе гетероструктур ПЭ/МС.

(а) – на поверхности ПЭ генерируется электрическое напряжение (U) – в потенциальном режиме; (б) – на поверхности ПЭ происходит изменение частоты генерации (ΔF) ПЭ – в токовом режиме.

СБИС – сверхбыстродействующая интегральная система.

трическое напряжение (U) – в потенциальном режиме (рис. 3а) или происходит изменение частоты генерации (ΔF) ПЭ – в токовом режиме (рис. 3б). При этом величины (амплитуды) сигнала пропорциональны напряженности магнитного поля H .

Проведенный цикл электрофизических и технологических исследований позволил с исполь-

зованием гетероструктур ПЭ/МС реализовать магнитоэлектрический эффект [2].

В табл. 3 приведены параметры ДМП на основе гетероструктуры ПЭ/МС (BaSrTiO/FeBSiC).

Таким образом, разработанная технология изготовления магнитоэлектрических ДМП (на ос-

Таблица 2. Технические и эксплуатационные характеристики различных типов датчиков магнитного поля

Характеристики	Протонный датчик (ММП-203М1С)	Сегнето-электрический датчик
Диапазон измерений, Гц	0.2–10	10^{-1} – 10^3
Пороговая чувствительность, нТл	0.1	0.01
Систематическая погрешность, не более, нТл	2.5	0.5
Время одного измерения и регистрации, не более, с	3.0	0.1
Потребляемая мощность, не более, Вт	1	0.01
Габаритные размеры магнито-чувствительного блока, мм	140 × 72 × 960	30 × 30 × 5
Вес, г	1400	50
Диапазон рабочих температур, °С	–30...+50	–30...+80

Таблица 3. Основные параметры ДМП на гетероструктурах ПЭ/МС

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон частот переменных магнитных полей, Гц	10...10 ³
Пороговая чувствительность, Тл	10 ⁻¹⁰
Постоянная времени, с	10 ⁻⁴
Диапазон рабочих температур, °С	±50
Габаритные размеры, мм	25.0 × 10.0 × 1.5
Вес, г	3.0

нове микроразмерных гетероструктур сложных оксидов пьезоэлектрических и магнитоэлектрических материалов) позволяет создавать магнитолокаторы, не имеющие ограничений по энергопотреблению и массогабаритным характеристикам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверкиев В.А., Нерсесов Б.А., Афанасьев С.А. и др.* Поисковые исследования по созданию нового поколения магнитометрических систем пассивной локализации // Отчет по НИР, шифр “Щипцы”. Ч. 3. МИРЭА, 2003. 142 с.
2. *Афанасьев М.С., Митягин А.Ю., Чучева Г.В.* Твердотельный датчик магнитного поля // Патент (RU) G01R/02 № 2478218 РФ, 27.03.2013. Владелец: Учреждение Российской академии наук Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.
3. *Афанасьев М.С., Нерсесов Б.А.* Морские магнитометрические системы поиска и контроля // ГНУ “Экспертно-аналитический центр” Минобрнауки РФ, 2012. 165 с.
4. *Нерсесов Б.А.* Определение местоположения ферромагнитных подводных объектов с помощью магнитолокатора // Материалы V Международной научно-технической конференции. М., 1999. С. 34–37.
5. *Семенов В.Г.* К измерению тензорных величин магнитного поля // Л.: Тр. ВНИИМ, 1981. С. 29–48.
6. *Яроцкий В.А.* Методы обнаружения и определения местоположения объектов по их постоянному магнитному полю // М.: Зарубежная радиоэлектроника. 1984. Вып. 3. С. 26–34.

Magnetolocation is a Promising Field of the Development of Magnetometric Means for the Search of Underwater Object

B. A. Nersesov, M. S. Afanasyev, E. I. Karabacheva

The theoretical aspects of developing of the third generation of survey magnetometers as a passive location means were examined. Practical recommendations on the evaluation of the accuracy characteristics of magnetic location systems were worked out. Information on the technology and specifications of new solid-state sensors for marine magnetic locators based on micro-sized heterostructures is given.