

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДАТЧИКА НА ГРАДИОМЕТРАХ В ЗАДАЧЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Жирков В.Ф., Новиков К.В., Сушкова Л.Т.

Владимирский государственный университет

**1. Введение.** При создании систем безопасности, в медицине, при прокладке коммуникаций и в других приложениях часто возникает задача обнаружения и локализации источников магнитного поля. В магнитоэлектрическом приближении источниками магнитного поля могут быть ферромагнитные объекты или контуры с постоянным или низкочастотным током. В электромагнитном поле любой проводящий объект может рассматриваться как источник магнитного поля, создаваемого индукционными токами. На достаточно большом расстоянии любой источник магнитного поля может рассматриваться как магнитный диполь. Измерение его пространственных координат и вектора магнитного момента (локализация) может быть выполнено, в частности, с помощью датчика магнитного поля, представляющего собой пару градиометров. В докладе представлены результаты исследований такого датчика. Оказывается, что характеристики датчика существенно зависят как от расстояния между элементами (базы) градиометра, так и от расстояния между градиометрами. При решении конкретных задач необходимо выбрать оптимальные параметры системы магнитометров. Приведена методика такого выбора. Результаты получены путем стохастического моделирования. В качестве критерия использовались зависимости среднеквадратичных ошибок измерения параметров магнитного диполя от параметров системы датчиков.

**2. Определение параметров магнитного диполя.** В [1] описан подход, основанный на использовании градиометра. Градиометр позволяет измерять тензор градиента напряженности магнитного поля.

$$G_{ij} = \frac{\partial H_i}{\partial x_j}, \quad i = 1..3, \quad j = 1..3, \tag{1}$$

где  $\vec{H} = 3 \frac{(\vec{m} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{m}}{r^3}$  (в системе единиц СГСМ),  $\vec{m}$  – вектор магнитного момента,  $\vec{r}$  – положение

точки, в которой определяется  $\vec{H}$  относительно диполя.

Вариант построения градиометра приведен на рис. 1. Тензор  $G$  не зависит от направления и величины однородного поля Земли, а определяется только взаимным положением градиометра и магнитного диполя.

Можно составить 9 уравнений относительно  $\vec{M} = \frac{3\vec{m}}{r^4}$  и  $\vec{n} = \frac{\vec{r}}{r}$

$$\frac{\partial H_k}{\partial x_j} = - \sum_i M_i N_{ijk}, \quad i = 1..3, \quad j = 1..3, \quad k = 1..3, \tag{2}$$

где  $N_{ijk} = 5n_i n_j n_k - (\delta_{ki} n_j + \delta_{kj} n_i + \delta_{jk} n_k)$ .

Однако из уравнений Максвелла следует, что

$$\frac{\partial H_1}{\partial x_3} = \frac{\partial H_3}{\partial x_1}, \quad \frac{\partial H_2}{\partial x_3} = \frac{\partial H_3}{\partial x_2}, \quad \frac{\partial H_3}{\partial x_3} = - \frac{\partial H_1}{\partial x_1} - \frac{\partial H_2}{\partial x_2}. \tag{3}$$

Поэтому среди уравнений (2) только 5 независимых. Система уравнений имеет 4 решения относительно  $\vec{M}$  и  $\vec{n}$ . Из них только одно соответствует истинному положению диполя. Чтобы определить, какое из решений является истинным, необходима дополнительная информация, источником которой может быть датчик вектора магнитной индукции или еще один градиометр. Для системы из двух градиометров, соответствующих схеме, изображенной на рис. 1, параметрами является расстояние между сенсорами в градиометре  $l$  и расстояние между градиометрами  $d$ .

Поскольку аналитические решения, полученные для описанной системы датчиков, очень громоздки, определение оптимальных параметров системы аналитическим путем, по-видимому, невозможно. Ниже предлагается подход к оптимизации параметров систем датчиков на основе стохастического моделирования.

**3. Стохастическая модель.** Процедура стохастического моделирования реализуется на ЭВМ следующим образом. Центр системы датчиков помещается в начало системы координат. Для определения зависимости среднеквадратичных ошибок определения параметров диполя с магнитным моментом равным по модулю  $M$  при заданном расстоянии  $R$  до датчика многократно выполняются следующие действия:

1. Случайным образом выбирается положение диполя  $\vec{r}$  на сфере радиуса  $R$ .
2. Случайным образом выбирается направление дипольного момента диполя  $\vec{m}$  с модулем  $M$ .
3. Рассчитывается магнитная индукция на всех датчиках  $\vec{B}_i(\vec{r}, \vec{m})$ .

4. Значения магнитной индукции искажаются аддитивным гауссовым шумом со среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{ui}$ :  $\vec{B}_i^* = \vec{B}_i + N(\sigma_{ui})$ .

5. По искаженным шумом значениям магнитной индукции выполняется расчет положения  $\vec{r}^*(\vec{B}_1^*, \dots, \vec{B}_N^*)$  и магнитного момента диполя  $\vec{m}^*(\vec{B}_1^*, \dots, \vec{B}_N^*)$ .

6. Для каждого положения диполя рассчитываются ошибка в локализации  $e_r = |\vec{r} - \vec{r}^*|$ .

В результате многократного повторения шагов 1-6 определяются среднеквадратичные значения ошибок при заданных параметрах модели.

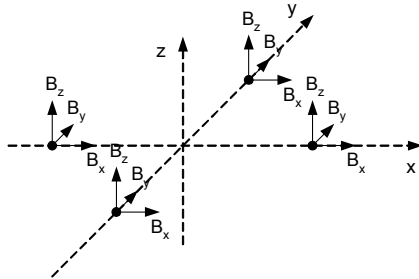


Рис. 1. Вариант построения градиометра

**4. Результаты.** Описанная модель позволяет для каждого набора параметров задачи локализации определить оптимальные значения параметров системы градиометров. Так на рис. 2 приведены зависимости ошибки локализации магнитного диполя с моментом  $M = 100 \text{ A} \cdot \text{м}^2$ , находящегося на расстоянии  $R = 6 \text{ м}$  от центра системы градиометров, при уровне шума на датчиках  $\sigma_{ш} = 10^{-11} \text{ Тл}$ . Для получения каждой точки на рис. 2 выполнялось 1000 экспериментов.

На рис. 3 приведены оптимальные параметры градиометров для заданного уровня шума и заданного расстояния до объектов, полученные путем стохастического моделирования. По оси абсцисс откладывается расстояние до магнитного диполя  $R$ . Среднеквадратичное значение шума  $\sigma_{ш}$  на датчиках показано в легенде.

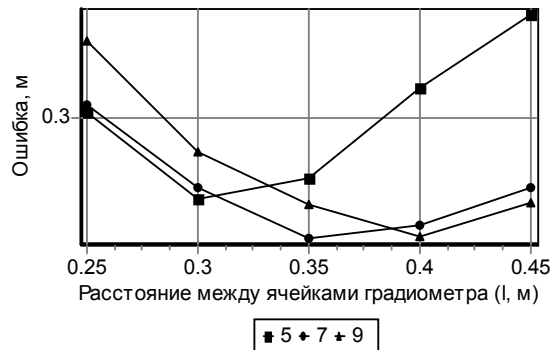


Рис. 2. Зависимости среднеквадратичной ошибки локализации магнитного диполя от параметров системы градиометров для одного набора параметров задачи локализации. В легенде расстояние между градиометрами задано в метрах

Из рис. 3 видно, что при увеличении  $R$  и  $\sigma_{ш}$  необходимо увеличивать  $l$ . Действительно, чем больше  $l$ , тем меньше шум влияет на разностный сигнал. Однако, при небольшом  $R$ , поле изменяется существенно нелинейно, и для обеспечения измерения градиента с достаточной точностью значение  $l$  должно быть меньше. Эти два фактора и определяют оптимальное значение  $l$ . Оптимальные значения параметра  $d$  объясняются на основе общих подходов к оценке погрешностей в задаче триангуляции. Вместе с тем, на оптимальные значения  $d$  влияют и вышеперечисленные факторы: увеличении  $d$  при увеличении шума на датчиках приводит к увеличению расстояния от диполя до градиометра, что позволяет увеличивать  $l$ , снижая тем самым воздействие шума.

**5. Заключение.** Предложенный подход на основе стохастического моделирования позволяет для различных практических задач выбирать оптимальные параметры системы магнитометрических датчиков.

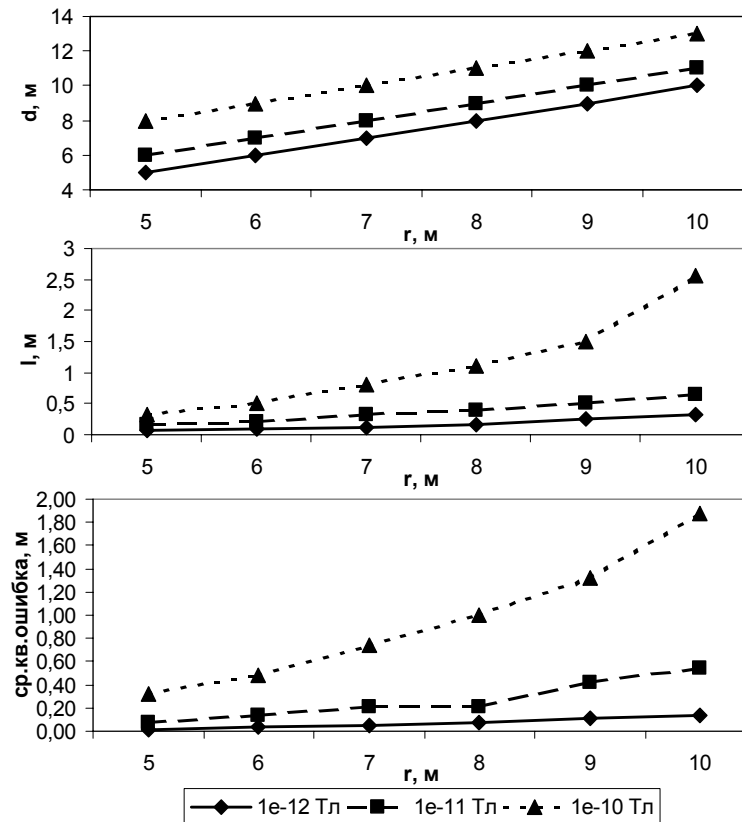


Рис.3. Оптимальные параметры датчика на 2-х градиометрах и минимальные ошибки локализации источников магнитного поля

ЛИТЕРАТУРА

1. Wynn W.M., Frahm C.P., Carroll P.J., Clark R.H., Wellhoner J., Wynn M.J. Advanced superconducting gradiometer/magnetometer arrays and a novel signal processing technique// IEEE Transactions on magnetics, vol. MAG-11.– 1975. – №2. – P. 701-707

