

НГТУ

**Разработка методов и  
алгоритмов предварительного  
анализа данных аэромагнитной  
разведки полезных ископаемых**

Ю. В. Морозов, А. А. Мурасев, А. А. Спектор

Бердск, Россия

2023

# Актуальность

- Использование магнитометров для разведки полезных ископаемых
- Установка магнетометров на БПЛА
- Необходимость калибровки магнитометров

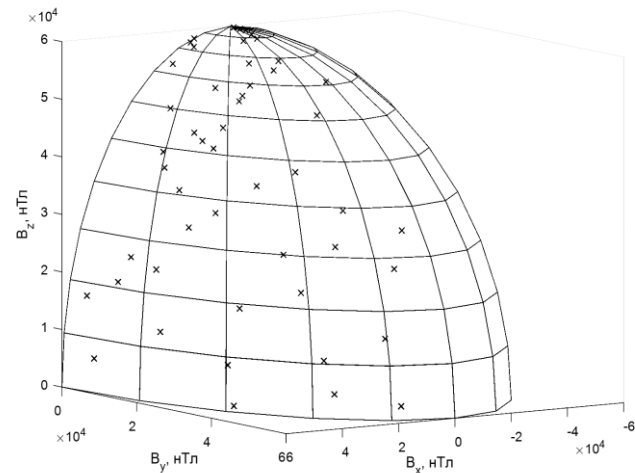
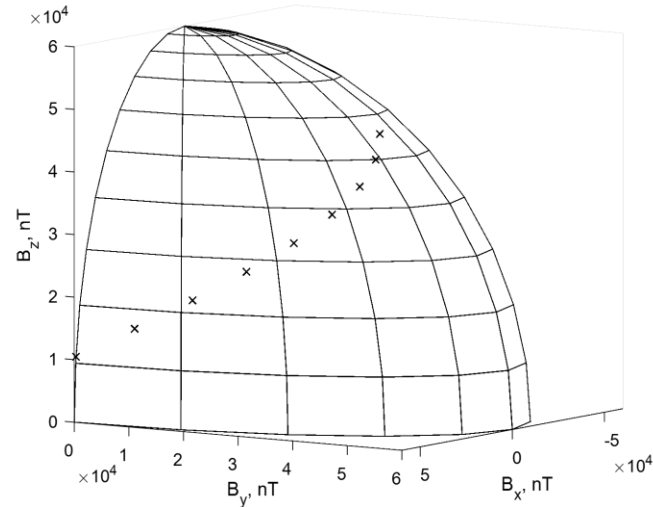
# Моделирование измерения вектора магнитной индукции

$$b_{xi} = |\vec{B}| \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{zi}$$

$$b_{yi} = |\vec{B}| \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{xi}\right) \cos \alpha_{zi}$$

$$b_{zi} = |\vec{B}| \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{zi}\right)$$

$$\alpha_{xi} \neq \alpha_{xj} \quad \alpha_{zi} \neq \alpha_{zj} \quad i \neq j$$



# Факторы, влияющие на точность магнитометра

- технологические неточности изготовления векторных магнитометров
- внешние помехи
- влияние температуры, при которой функционирует измеритель
  
- Основной задачей настоящей работы является изучение механизмов влияния технологических погрешностей на ошибки измерения, разработка методов получения оценок этих погрешностей и их компенсации в рабочих сигналах, регистрируемых при решении практических задач

# Статистический метод среднеквадратической невязки

- Изучение сигналов магнитометра FGM 75/3, записи которых были получены при проведении экспериментов в обсерватории, свидетельствует о присутствии некоррелированного шума со средним квадратичным значением порядка (0,1...1) нТл.
- Наличие шума приводит к флюктуационным ошибкам при оценивании всех девяти параметров магнитометра (по три параметра смещения, чувствительности и неортогональности), образующих в совокупности вектор калибровочных параметров

$$\vec{A} = \|\lambda_1 = w_1, \lambda_2 = w_2, \lambda_3 = w_3, \lambda_4 = s_1, \lambda_5 = s_2, \lambda_6 = s_3, \lambda_7 = u_1, \lambda_8 = u_2, \lambda_9 = u_3\|^t$$

смещение

чувствительность

неортогональность

# Описание статистического метода

$$\varepsilon_i(\vec{\Lambda}) = \psi(\vec{\Lambda}, \vec{F}_i) - B_0^2, \quad i = \overline{1, I}$$

$$\vec{\varepsilon}(\vec{\Lambda}) = \left\| \varepsilon_1(\vec{\Lambda}), \varepsilon_2(\vec{\Lambda}), \dots, \varepsilon_I(\vec{\Lambda}) \right\|^t$$

$$E(\vec{\Lambda}) = \sum_{i=1}^I \varepsilon_i^2(\vec{\Lambda}) = \vec{\varepsilon}^t(\vec{\Lambda}) \cdot \vec{\varepsilon}(\vec{\Lambda}) = \min_{\vec{\Lambda}}$$

$$\frac{dE(\vec{\Lambda})}{d\vec{\Lambda}} = \left\| \frac{dE(\vec{\Lambda})}{d\lambda_1}, \frac{dE(\vec{\Lambda})}{d\lambda_2}, \dots, \frac{dE(\vec{\Lambda})}{d\lambda_9} \right\| = 0$$

# Итерационное решение системы уравнений путем линеаризации

$$\psi(\bar{\lambda}, \bar{F}_i) = \psi(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i) + \bar{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i) (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{k-1}^*), \quad i = \overline{1, I}$$

$$\bar{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i) = \left\| \frac{d\psi(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i)}{d\lambda_1}, \frac{d\psi(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i)}{d\lambda_2}, \dots, \frac{d\psi(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i)}{d\lambda_9} \right\|, \quad i = \overline{1, I}$$

$$\bar{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*) = \left\| \begin{array}{c} \bar{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_1) \\ \bar{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_2) \\ \vdots \\ \bar{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_I) \end{array} \right\|$$

$$\bar{\varepsilon}(\bar{\lambda}) = \bar{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*) \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{k-1}^*) - \bar{b}_k,$$

$$\bar{b}_k = \|b_{1k}, b_{2k}, \dots, b_{Ik}\|^t.$$

# Решение уравнения с квадратом НЕВЯЗКИ

$$E(\vec{\lambda}) = (\vec{\lambda} - \vec{\lambda}_{k-1}^*)^t \Psi'^t(\vec{\lambda}_{k-1}^*) \Psi'(\vec{\lambda}_{k-1}^*) (\vec{\lambda} - \vec{\lambda}_{k-1}^*) - \\ - 2\vec{b}_k^t \Psi'(\vec{\lambda}_{k-1}^*) (\vec{\lambda} - \vec{\lambda}_{k-1}^*) + \vec{b}_k^t \vec{b}_k$$

$$\frac{dE(\vec{\lambda})}{d\vec{\lambda}} = \vec{\lambda}^t \mathbf{A} - \vec{\lambda}_{k-1}^{*t} \mathbf{A} - \vec{b}_k^t \Psi'(\vec{\lambda}_{k-1}^*) = 0$$

$$\mathbf{A} = \Psi'^t(\vec{\lambda}_{k-1}^*) \Psi'(\vec{\lambda}_{k-1}^*)$$

$$\vec{\lambda}^t \equiv \vec{\lambda}_k^{*t} = \vec{\lambda}_{k-1}^{*t} + \vec{b}_k^t \Psi'(\vec{\lambda}_{k-1}^*) \mathbf{A}^{-1}$$

$$\mu(\vec{\lambda}) = \frac{E(\vec{\lambda})}{I \cdot B_0^2} < \mu_{\text{дон}}$$



# Влияние шага квантования АЦП на калибровку датчика МСКН

- неизвестна (известна неточно) величина шага квантования сигналов в аналого-цифровом преобразователе

$$k_1 = 133 \text{ мкВ} / \text{нТл}$$

паспортная чувствительность датчика

$$k_2$$

разрешение АЦП, мкВ/квант

$$k_0 = k_1 / k_2$$

$$k_0 = B_{\text{нш}} / 2^m$$

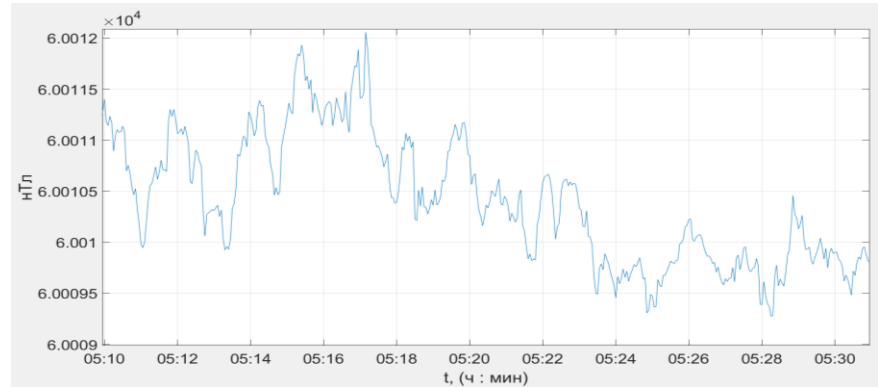
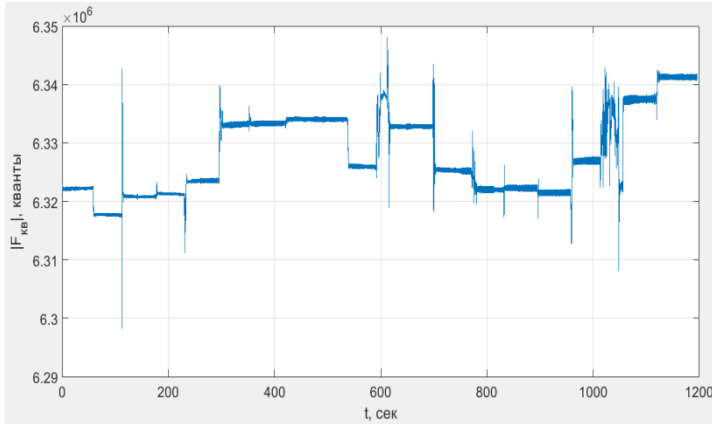
# Влияние неточности задания шага квантования АЦП

$k_0^*$ , нТл/ квант	$k_2^*$ , мкВ/ квант	$\delta\lambda_{\max}^{sign(\delta\lambda_{\max})}$ , %
0,0101	1,35	-17
0,0095	1,26	-12
0,0089	1,19	-6
0,0083	1, 11	1
0,0077	1,03	9
0,0072	0,95	17

# Эксперимент – исходные данные

- на площадке комплексной магнитной ионосферной станции (КМИС) ИНГГ СО РАН [11].
- Исследовался векторный магнитометр Sensys FGM3D/75.
- Параллельно записывались измерения протонного магнитометра высокой точности.
- Датчики располагались на расстоянии  $\sim 15$  метров.
- В эксперименте исследуемый датчик последовательно устанавливался в некоторое фиксированное положение, и сигнал записывался в течение одной минуты («статический» эксперимент).
- котором магнитометр поочередно устанавливался в 18 положениях (9 положений по азимуту и 2 – по углу места). Длительность записи для одного положения датчика  $\sim 1$  мин. Записанные данные измеряются в квантах АЦП. Частота дискретизации – 7.8 кГц.

# Результаты эксперимента



Модуль магнитного поля (кванты) Модуль магнитного поля протонного магнитометра

$$F_{нТл} = F_{кв} \cdot \frac{k_2}{k_1} \quad \text{модуль магнитного поля} - 60010 \text{ нТл}$$

Цена кванта  $k_2$  подбирается таким образом, чтобы среднее значение совпадало с показаниями протонного магнитометра.

$$k_2 = 1.261 \text{ мкВ}$$

# Заключение

- Представлены результаты исследования проблемы калибровки векторного магнитометра.
- Предложен и получил развитие новый подход, который реализует идею минимизации невязки калибровочных уравнений.
- На этапе калибровки происходит статистическая оценка физических параметров векторного измерителя.
- Метод прошел успешную экспериментальную проверку, свидетельствующую о возможности внедрения в практику.

# Контакты

- E-mail
  - [spectora@mail.ru](mailto:spectora@mail.ru)
- Телефон
  - +7 (383) 346-13-78