

ОБРАБОТКА БОРТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЗАДАЧАХ НАВИГАЦИИ И ГЕОФИЗИКИ

Каршаков Е.В.
Лаборатория № 1



ГЛАВНАЯ

ИСТОРИЯ

ТЕОРИЯ

ПРАКТИКА

ПУБЛИКАЦИИ

2005-2008 годы

Системы навигации и управления для решения задач аэрогеофизической съемки

Каршаков Е.В.
Лаборатория № 1

Системы навигации и управления для решения задач аэрогеофизической съемки

Каршаков Е.В., вед. инженер, к.ф.-м.н.

Лаборатория №1, ЗАО «Геотехнологии»

Обзор задач

1. Магниторазведка	3. Инфракрасная съемка
1.1 Разработка магнитометров	3.1 Разработка тепловизоров
1.2 Компенсация влияния намагничивания летательного аппарата на показания магнитометра	3.2 Корректируемая инерциальная система ориентации
1.3 Магнитовариационные станции	3.3 Построение тепловых карт
2. Электроразведка	4. Управление мотором сканера
2.1 Разработка электроразведочных систем	5. Гравитарезка
2.2 Определение навигационных параметров системы	5.1 Система ориентации сваяжного гравиметра
2.3 Исправление данных, обратная задача	5.2 Модель гравиметрической системы
3. Гамма-спектрометрия	6. Общие задачи
	6.1 Управление процессом съемки
	6.2 Система сбора данных
	6.3 Управление съемочным комплексом

1. Управление процессом съемки

1. Управление процессом съемки

$\Delta\varphi, \Delta\lambda$

1. Управление процессом съемки

$\Delta\varphi, \Delta\lambda$
 $t + \Delta t$

$\vec{V}, \vec{\Omega}$

1. Управление процессом съемки

$\Delta\varphi, \Delta\lambda$ $\vec{V}, \vec{\Omega}$
 $t + \Delta t$

1. Управление процессом съемки

Заход на маршрут: $L, \kappa \rightarrow \min$

$\Delta\varphi, \Delta\lambda$ $\vec{V}, \vec{\Omega}$
 $t + \Delta t$

1. Управление процессом съемки

2. Корректируемая инерциальная система ориентации

$dA/dt = \Omega A$

коррекция:
 $\vec{z} = \vec{a} - \vec{a}_{\text{гпр}}$

$dx/dt = Cx + q$
 $z = Hx + r$
 $Mq = 0, M(qq^T) = Q$
 $Mr = 0, M(r r^T) = R$

Фильтр Калмана \hat{x}

2. Корректируемая инерциальная система ориентации

3. Навигационные параметры выпускной гондолы

3. Навигационные параметры выпускной гондолы

3. Навигационные параметры выпускной гондолы

$\forall \vec{H}_v = \vec{\Omega}(\vec{R}) \times \vec{M}$
 $\exists \vec{H}_v = \vec{\Omega}(\vec{R}) \times \vec{M}$
 $\vec{H}_c = \vec{\Omega}(\vec{R}) \times \vec{C}$

$\vec{\Omega}(\vec{R}) = \frac{3\vec{R}\vec{R}^T - E}{R^3}$

4. Компенсация влияния намагничивания летательного аппарата на показания магнитометра

$B_{\text{изм}} = B + \Delta B$
 $\Delta B = K + M_1 B + M_2 dB/dt$ (Leliak)

4. Компенсация влияния намагничивания летательного аппарата на показания магнитометра

$B_{\text{изм}} = B + \Delta B$
 $\Delta B = K + M_1 B + M_2 dB/dt$ (Leliak)

Рис.2. Структурная зависимость изм. и паразитной величины от скорости вращения 1 сек

4. Компенсация влияния намагничивания летательного аппарата на показания магнитометра

$B_{\text{изм}} = B + \Delta B$
 $\Delta B = K + M_1 B + M_2 dB/dt$ (Leliak)

$dX_i/dt = 0, dX_j/dt = A(V) X_j + q$
 $Mq = 0, M(qq^T) = Q$

Фильтр Калмана $\rightarrow \hat{X}_1, \hat{X}_2$

Рис.2. Структурная зависимость изм. и паразитной величины от скорости вращения 1 сек



ГЛАВНАЯ

ИСТОРИЯ

ТЕОРИЯ

ПРАКТИКА

ПУБЛИКАЦИИ

2005-2008 годы

Системы навигации и управления для решения задач аэрогеофизической съемки


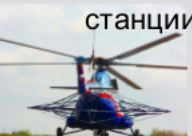

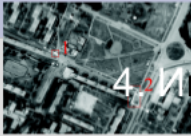

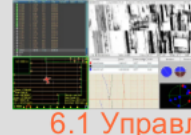
Каршаков Е.В.
Лаборатория № 1

Системы навигации и управления для решения задач аэрогеофизической съемки

2. Корректируемая инерциальная система

3. Навигационные параметры выпусковой

Обзор задач

- **1. Магниторазведка**
 - 1.1 Разработка магнитометров
 - 1.2 Компенсация влияния намагничивания летательного аппарата на показания магнитометра
 - 1.3 Магнитовариационные станции
- **2. Электроразведка**
 - 2.1 Разработка электроразведочных систем
 - 2.2 Определение навигационных параметров системы
 - 2.3 Интерпретация данных, прямая и обратная задача
- **3. Гамма-спектрометрия**
- **4. Инфракрасная съемка**
 - 4.1 Разработка тепловизоров
 - 4.2 Корректируемая инерциальная система ориентации
 - 4.3 Построение тепловых карт
 - 4.4 Управление мотором сканера
- **5. Гравиразведка**
 - 5.1 Система ориентации скважинного гравиметра
 - 5.2 Модель гравивариометра
- **6. Общие задачи**
 - 6.1 Управление процессом съемки
 - 6.2 Система сбора данных
 - 6.3 Управление съемочным комплексом

1. М

1.1 Разработка магнитометров

1.2 Компенсация влияния намагничивания летательного аппарата на показания магнитометра

1.3 Магнитовариационные станции

2. Э

2.1 Разработка электроразведочных систем

2.2 Определение навигационных параметров системы

2.3 Интерпретация данных, прямая и обратная задача

3. Гамма

4. Инфракрасная

5. Гравиразведка

6. Общие задачи

1. Уп

1. Уп

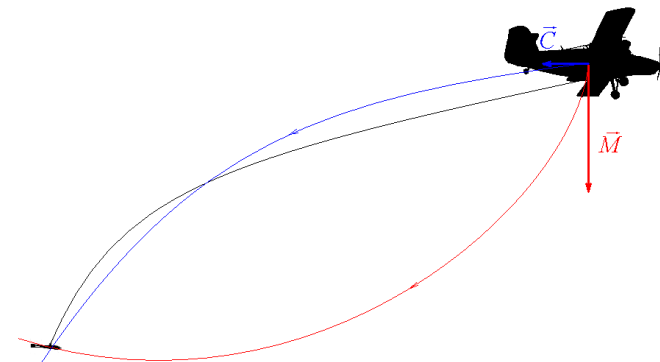
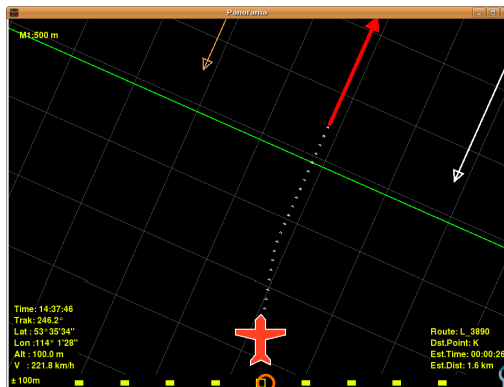
Фильтр Калмана $\rightarrow \hat{x}_1, \hat{x}_2$

Рис. 2. Структурная модель блока корректируемой инерциальной системы



2008-2018 годы

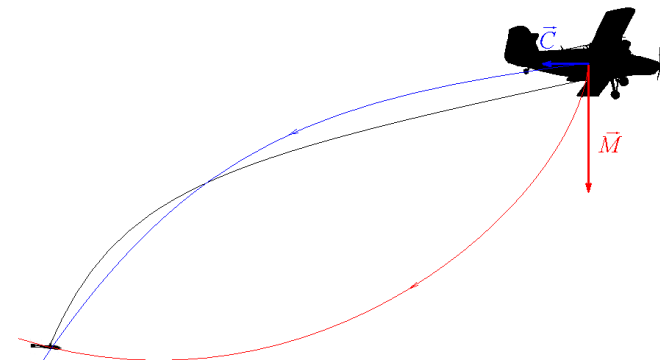
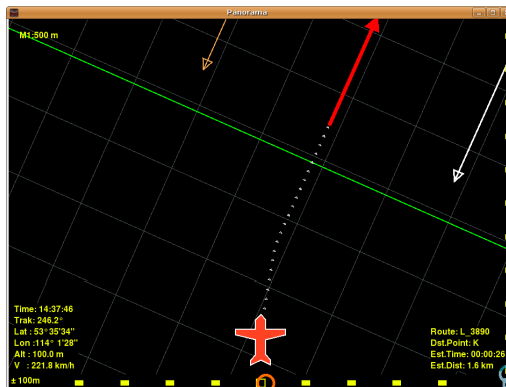
Применения теории управления и навигации к задачам геофизики



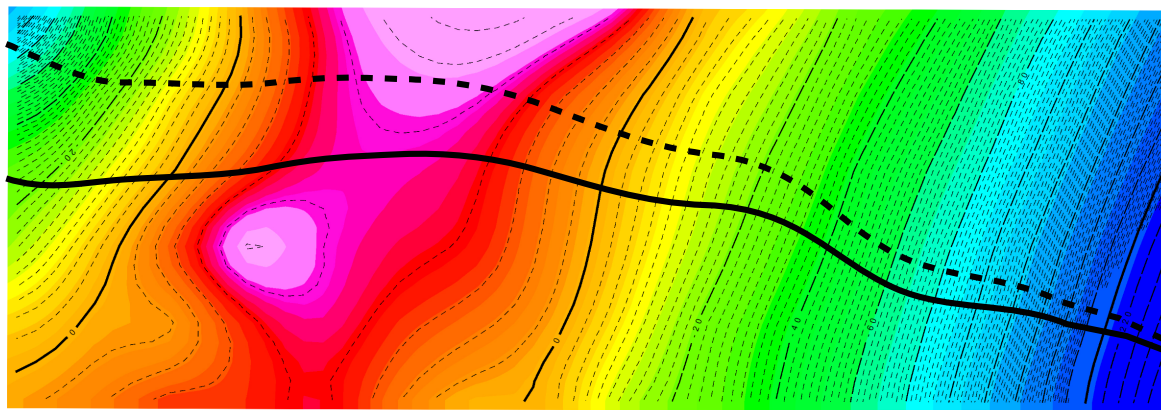
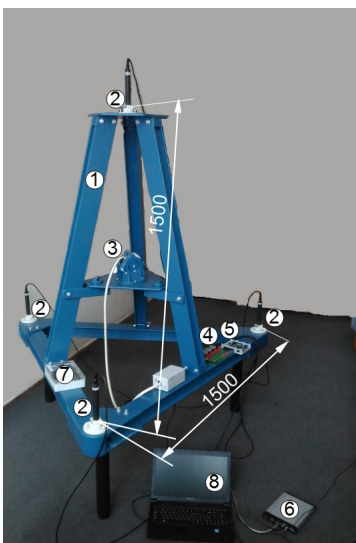


2008-2018 годы

Применения теории управления и навигации к задачам геофизики



Применения геофизики к задачам навигации и управления





ГЛАВНАЯ

ИСТОРИЯ

ТЕОРИЯ

ПРАКТИКА

ПУБЛИКАЦИИ

Бортовые
измерения -

Пространственные
физические поля -

Задачи
навигации -

Задачи
геофизики -

Обработка
информации -



Бортовые

измерения - измерения на борту движущегося объекта (самолет, вертолет, ...)

Пространственные

физические поля -

Задачи

навигации -

Задачи

геофизики -

Обработка

информации -



Бортовые

измерения - измерения на борту движущегося объекта (самолет, вертолет, ...)

Пространственные

физические поля - поля трехмерной структуры (магнитное, гравитационное, ...)

Задачи

навигации -

Задачи

геофизики -

Обработка

информации -



Бортовые

измерения - измерения на борту движущегося объекта (самолет, вертолет, ...)

Пространственные

физические поля - поля трехмерной структуры (магнитное, гравитационное, ...)

Задачи

навигации - задача определения угловых и пространственных координат

Задачи

геофизики -

Обработка

информации -



Бортовые

измерения - измерения на борту движущегося объекта (самолет, вертолет, ...)

Пространственные

физические поля - поля трехмерной структуры (магнитное, гравитационное, ...)

Задачи

навигации - задача определения угловых и пространственных координат

Задачи

геофизики - изучение физических свойств приповерхностной части Земли

Обработка

информации -



Бортовые

измерения - измерения на борту движущегося объекта (самолет, вертолет, ...)

Пространственные

физические поля - поля трехмерной структуры (магнитное, гравитационное, ...)

Задачи

навигации - задача определения угловых и пространственных координат

Задачи

геофизики - изучение физических свойств приповерхностной части Земли

Обработка

информации - выходные сигналы, первичные данные, интерпретация



СТРУКТУРА БОРТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

$$f = f_n + f_a + f_v + \Delta f + \delta f$$

f_n – нормальная составляющая поля

f_a – аномальная составляющая поля

f_v – вариационная составляющая поля

Δf – поле носителя и влияние его динамики

δf – инструментальные погрешности



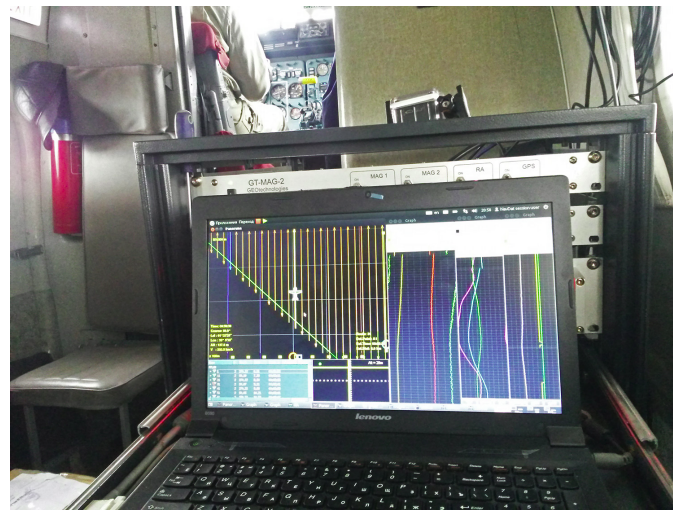
СТРУКТУРА
БОРТОВЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ

$$f = f_n + f_a + f_v + \Delta f + \delta f$$

f	f_n	f_a	f_v	Δf	δf
B , нТл	50000	1000	10	100	0.001
g , Гал	1000	100	0.0001	100	0.0001
H , мА/м	100	1	0.001	1	0.001



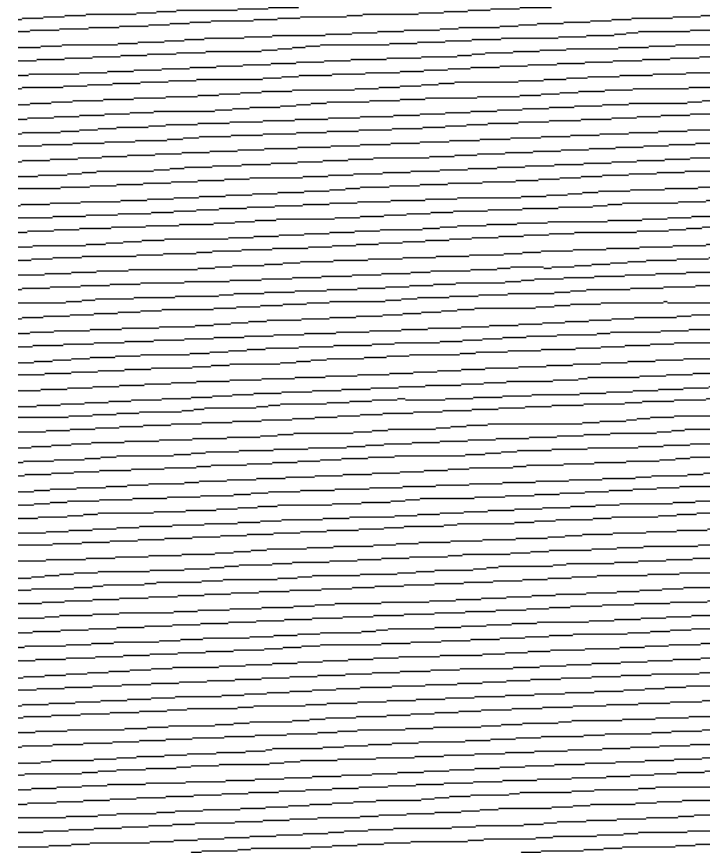
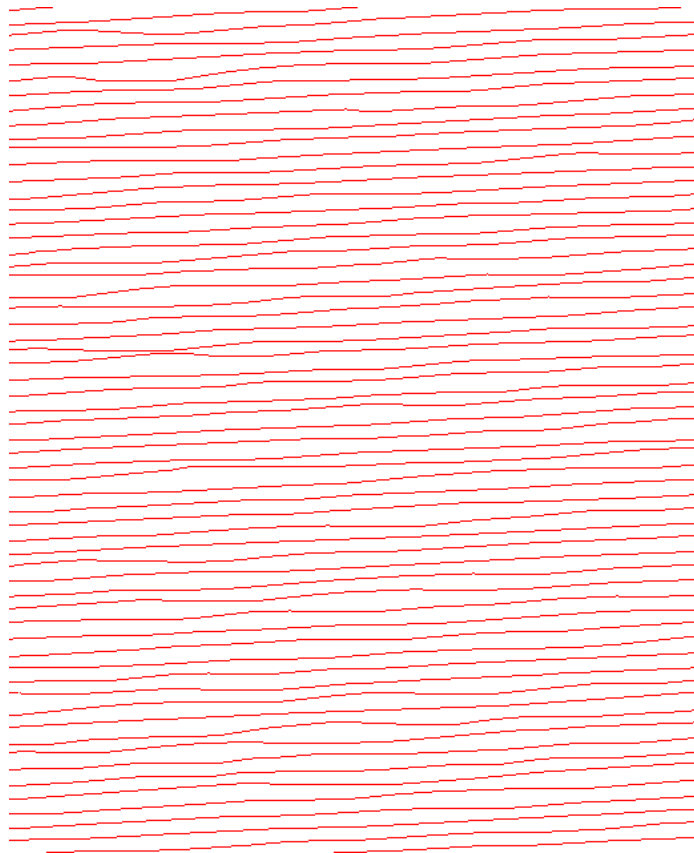
УПРАВЛЕНИЕ ПРОВОДКОЙ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА





УПРАВЛЕНИЕ ПРОВОДКОЙ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

ФАКТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ ПУТИ, М1:5000



ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕКТОРА ГРАДИЕНТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ



МЕТОДИКА

$$B_{mes} = B_0 + B_{perm} + B_{ind} + B_{eddy} = B_0 + K^T e_F + e_F^T M_i e_F + \frac{de_F^T}{dt} M_e e_F$$

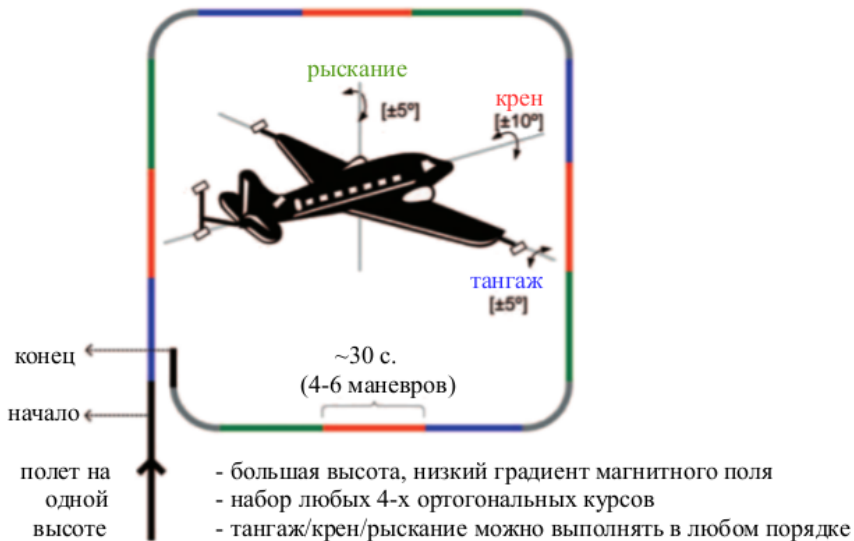
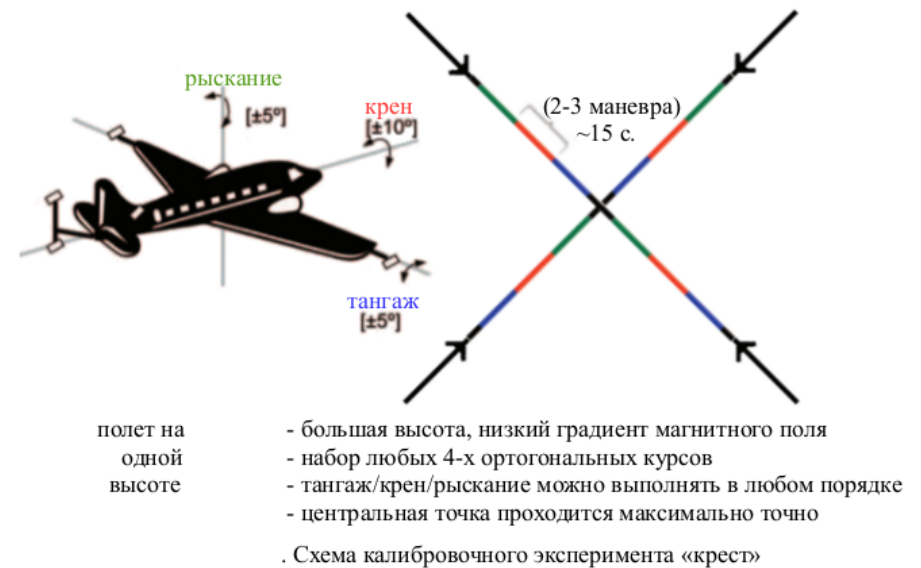


Схема калибровочного эксперимента «коробка»





ИЗМЕРЕНИЕ
ПАРАМЕТРОВ
ВЕКТОРА
ГРАДИЕНТА
МАГНИТНОГО ПОЛЯ

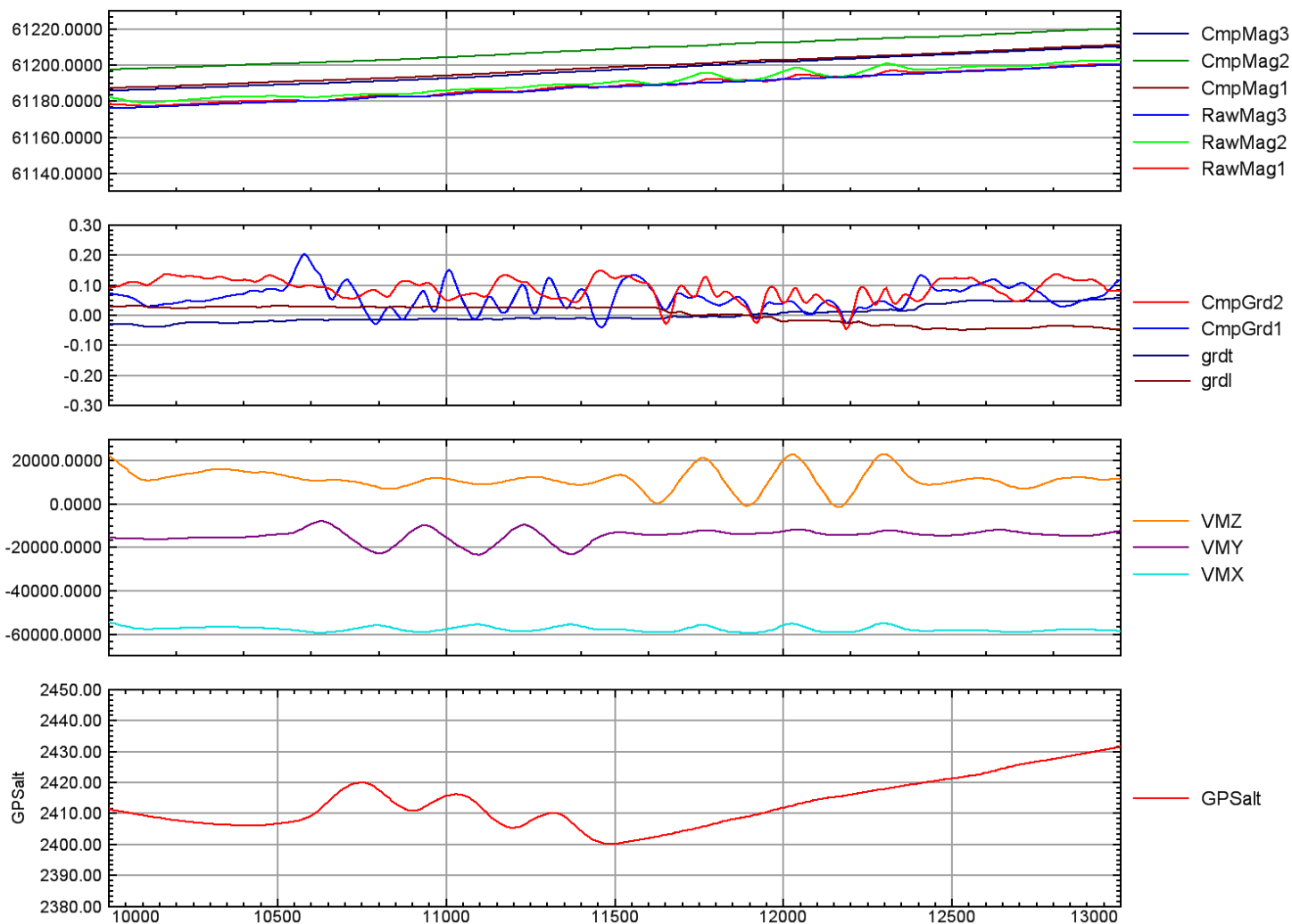


RMS INSTRUMENTS
For Geophysical Exploration **DAARC500**

DATA ACQUISITION &
ADAPTIVE AEROMAGNETIC REAL-TIME
COMPENSATION

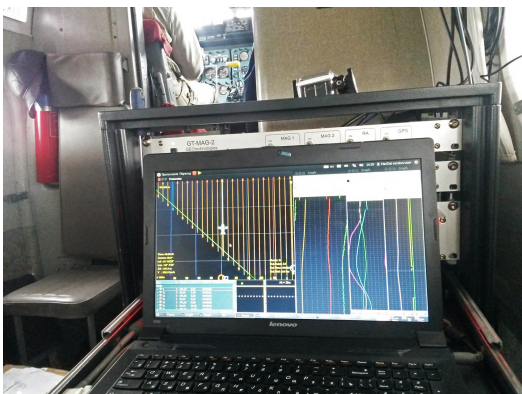


RMS Instruments, Cessna 208 Grand Caravan

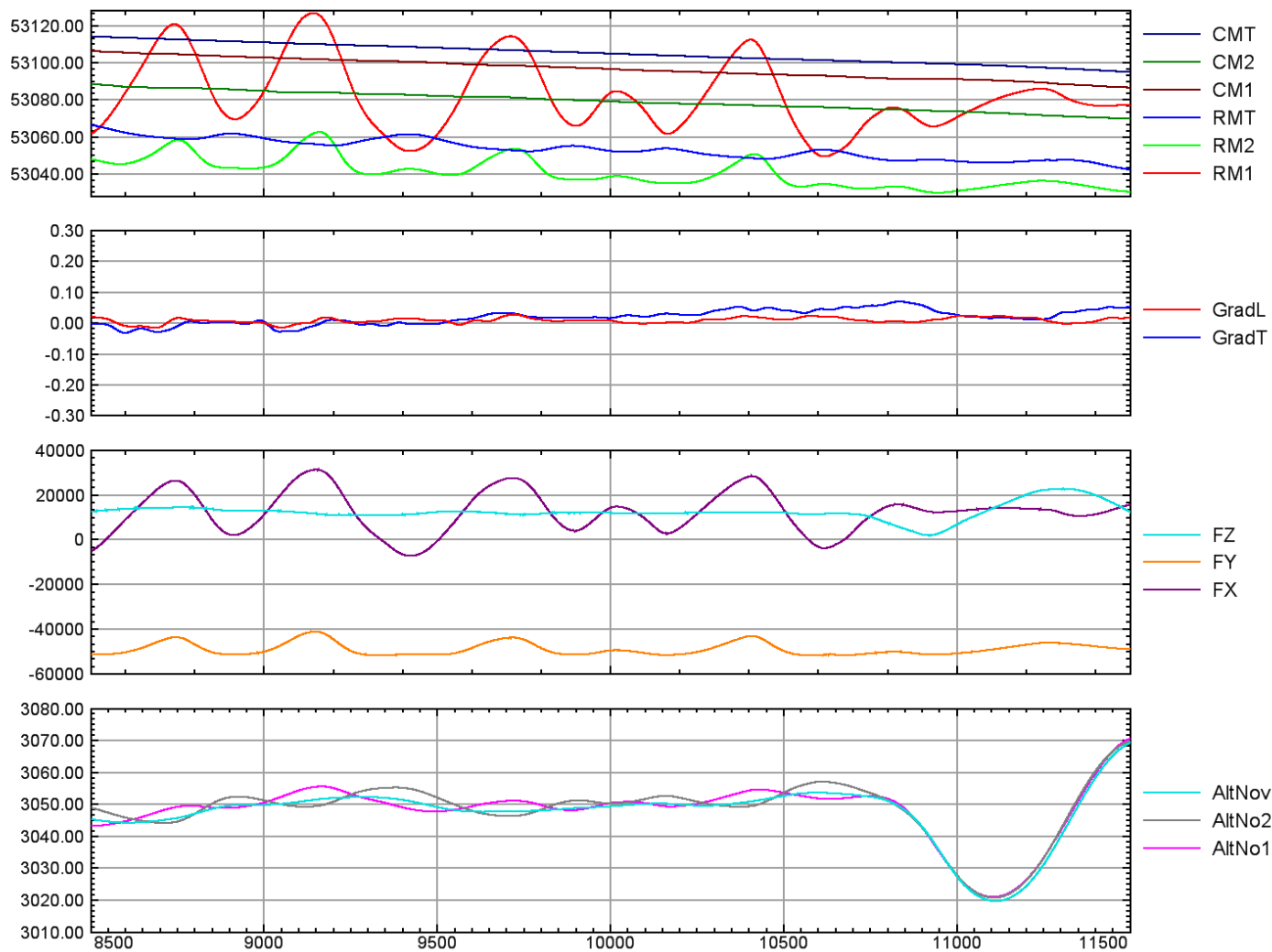




ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕКТОРА ГРАДИЕНТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

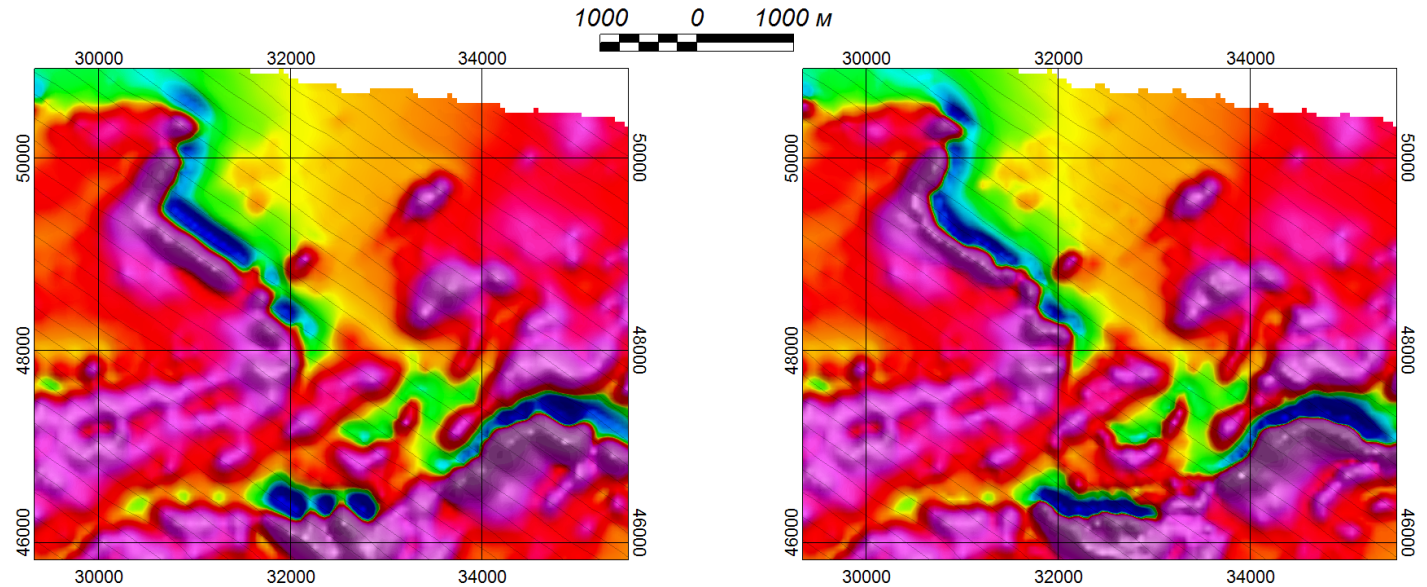
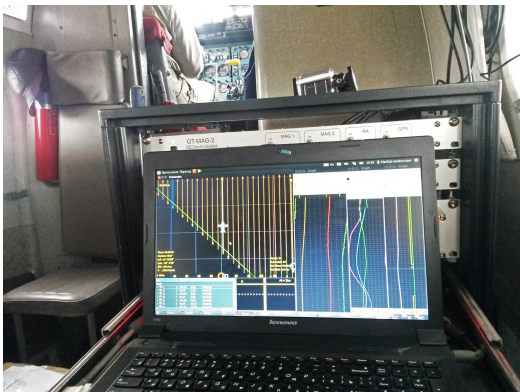


Ан-3





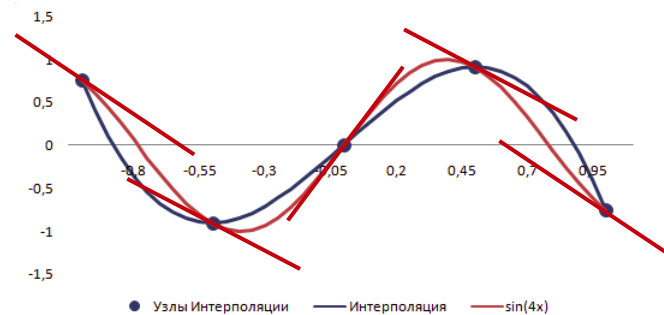
ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕКТОРА ГРАДИЕНТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ



Шкала раскраски величины полного вектора магнитной индукции, нТл
52486 53259 53319 53355 53403 56121

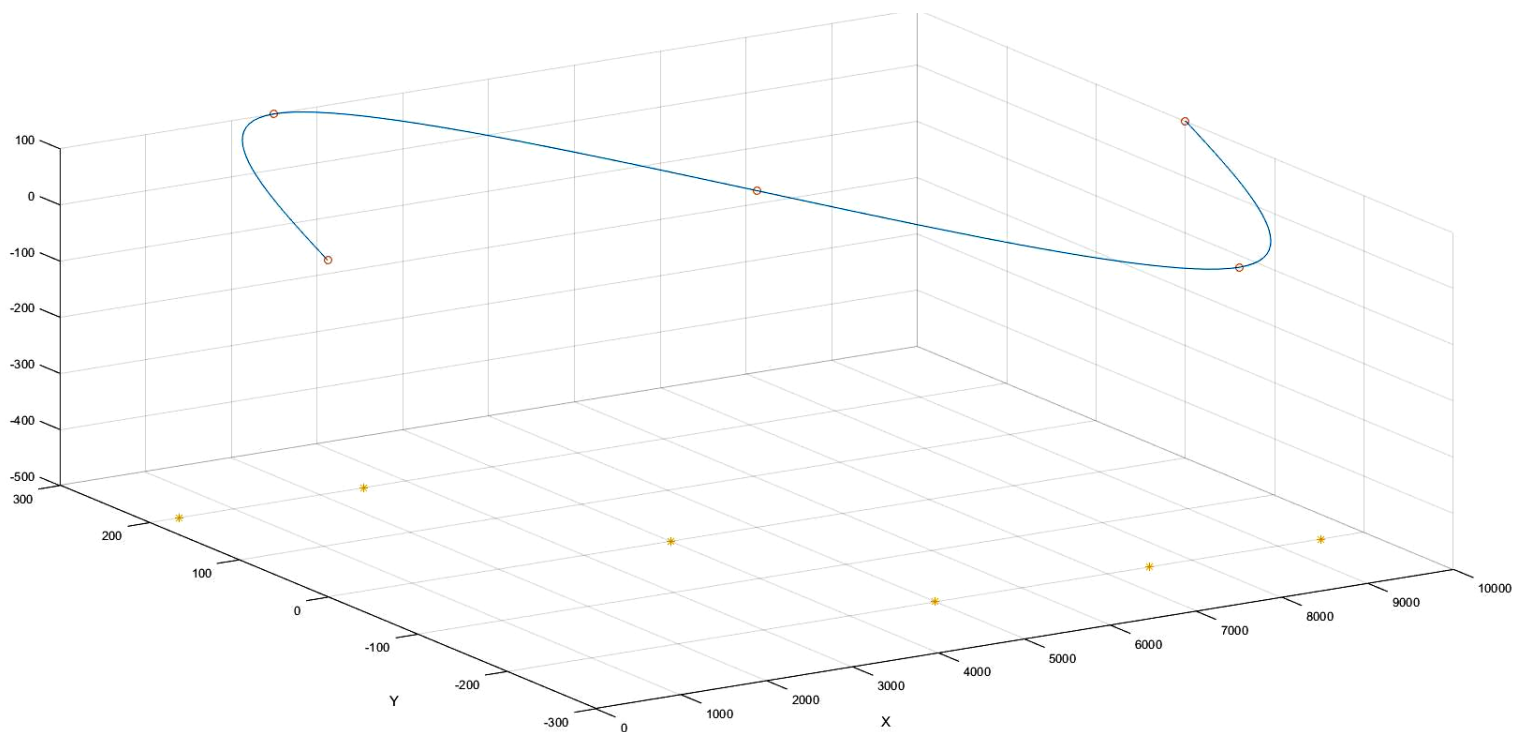
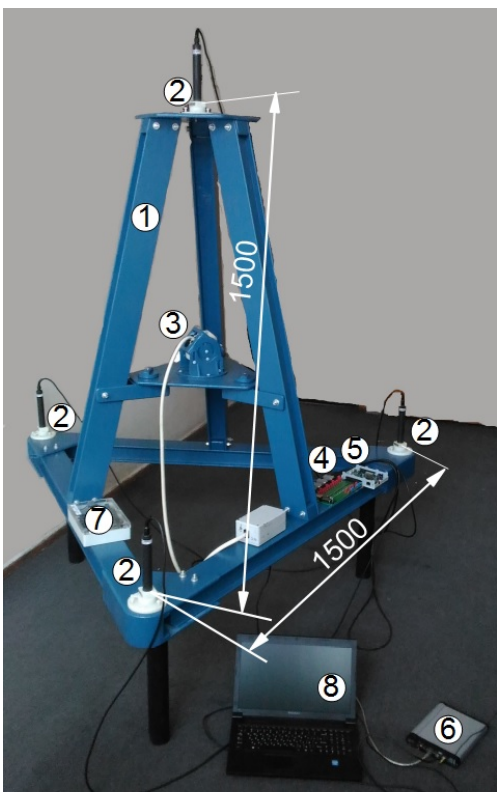
без учета градиента

с учетом градиента



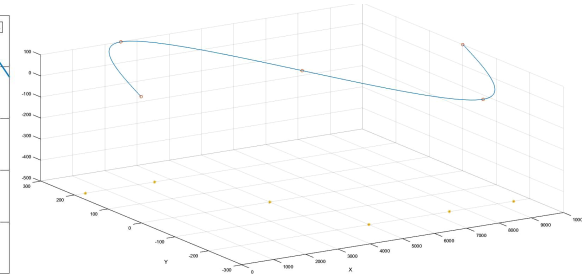
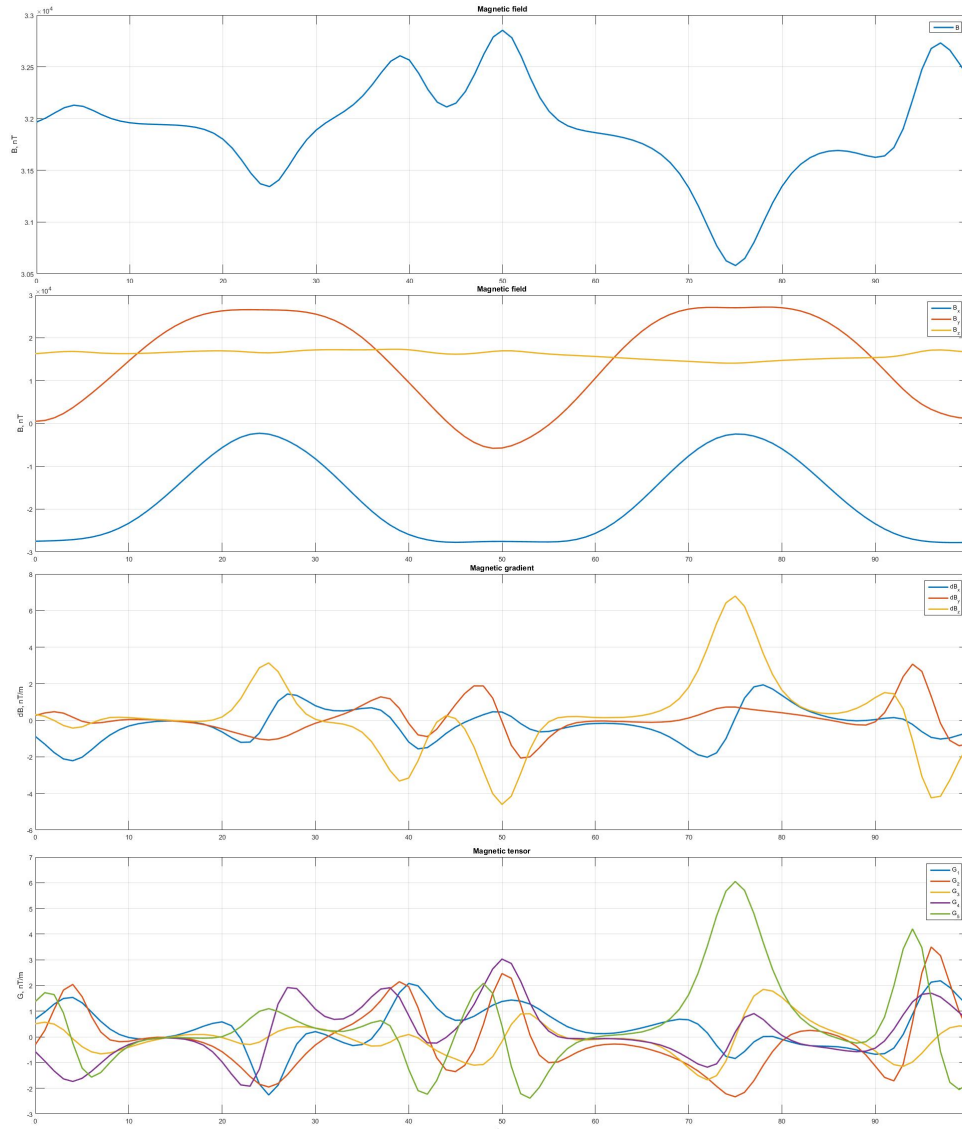
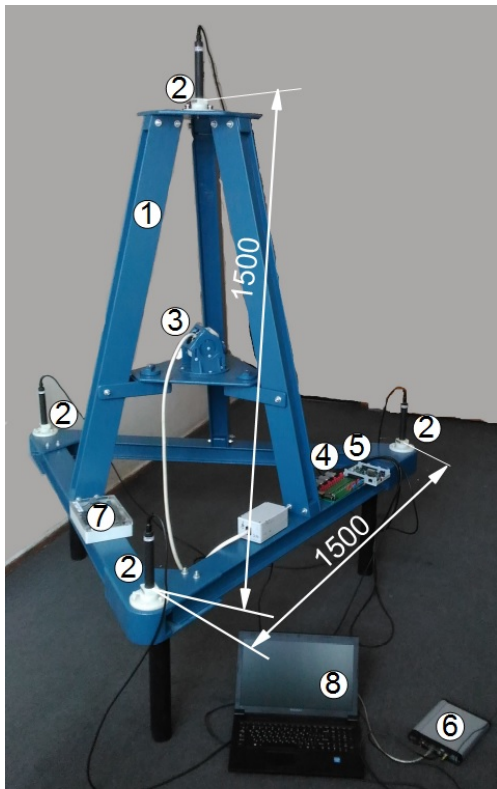


РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ



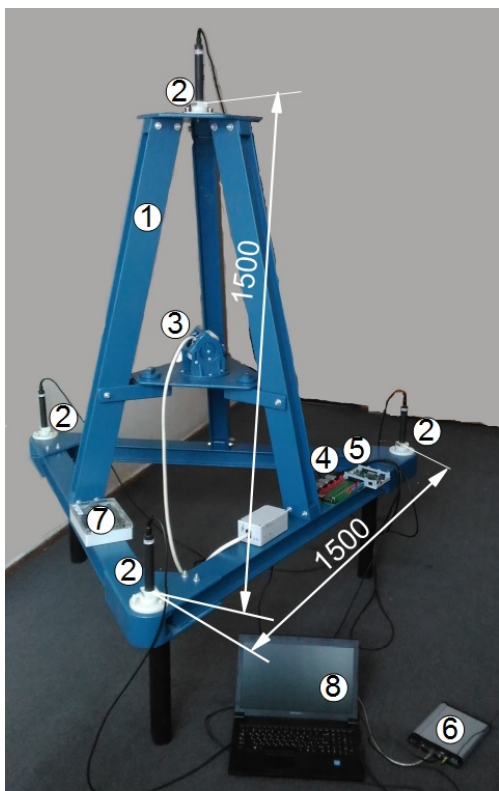


РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ





РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ



БИНС

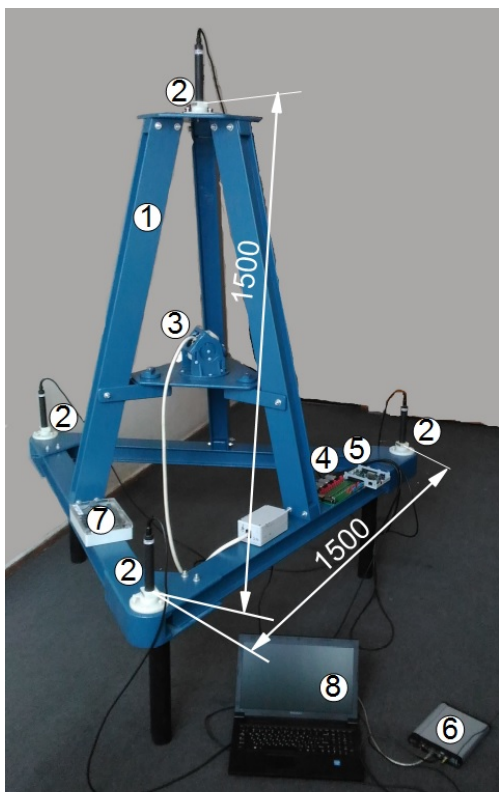
Класс точности ИНС	Тип датчика	
	Датчик угловой скорости, СКО шума (1 с)	Акселерометр, СКО шума (1 с)
Низкий	0,005 с ^{-0,5}	0,01 м/с ^{1,5}
Высокий	0,0001 с ^{-0,5}	0,0001 м/с ^{1,5}

Магнитные датчики

	Тип корректирующей информации				
	Модуль поля	Вектор поля	Вектор градиента поля	Тензор градиента (феррозонд)	Тензор градиента (СКВИД)
СКО шума	0,05 нТл (10 нТл)	1 нТл (10 нТл)	0,005 нТл/м	1 нТл/м	0,005 нТл/м



РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

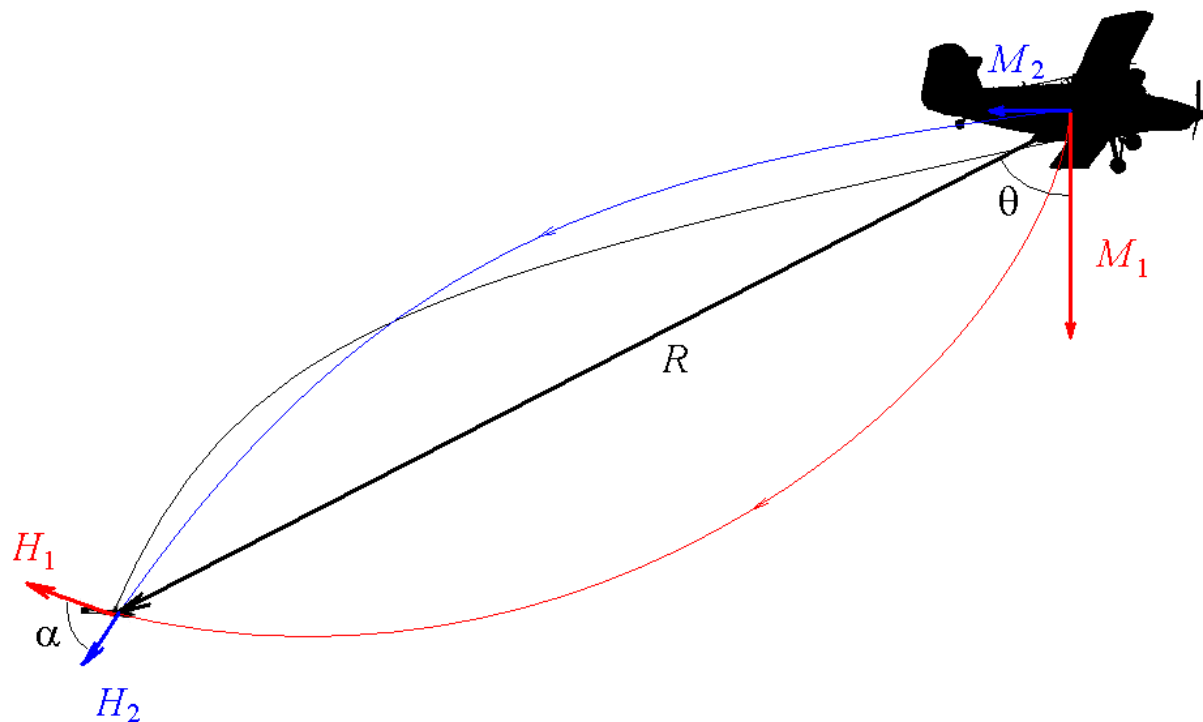


Оценка точности

Класс точности БИНС	Тип корректирующей информации					
	Модуль поля	Модуль поля (учет вариаций)	Вектор поля	Вектор градиента поля	Тензор градиента (феррозонд)	Тензор градиента (СКВИД)
Низкий	<i>Расходится</i>	Коорд.: 1,93 м Скор.: 0,68 м/с Углы: 2,8°	<i>Расходится</i>	Коорд.: 3,29 м Скор.: 0,58 м/с Углы: 0,8°	Коорд.: 27,5 м Скор.: 3,5 м/с Углы: 2,2°	Коорд.: 2,0 м Скор.: 0,29 м/с Углы: 0,5°
Высокий	Коорд.: 4,88 м Скор.: 0,22 м/с Углы: 0,26°	Коорд.: 0,07 м Скор.: 0,02 м/с Углы: 0,10°	Коорд.: 1,03 м Скор.: 0,08 м/с Углы: 0,03°	Коорд.: 0,23 м Скор.: 0,04 м/с Углы: 0,03°	Коорд.: 11,8 м Скор.: 0,59 м/с Углы: 0,61°	Коорд.: 0,26 м Скор.: 0,04 м/с Углы: 0,03°

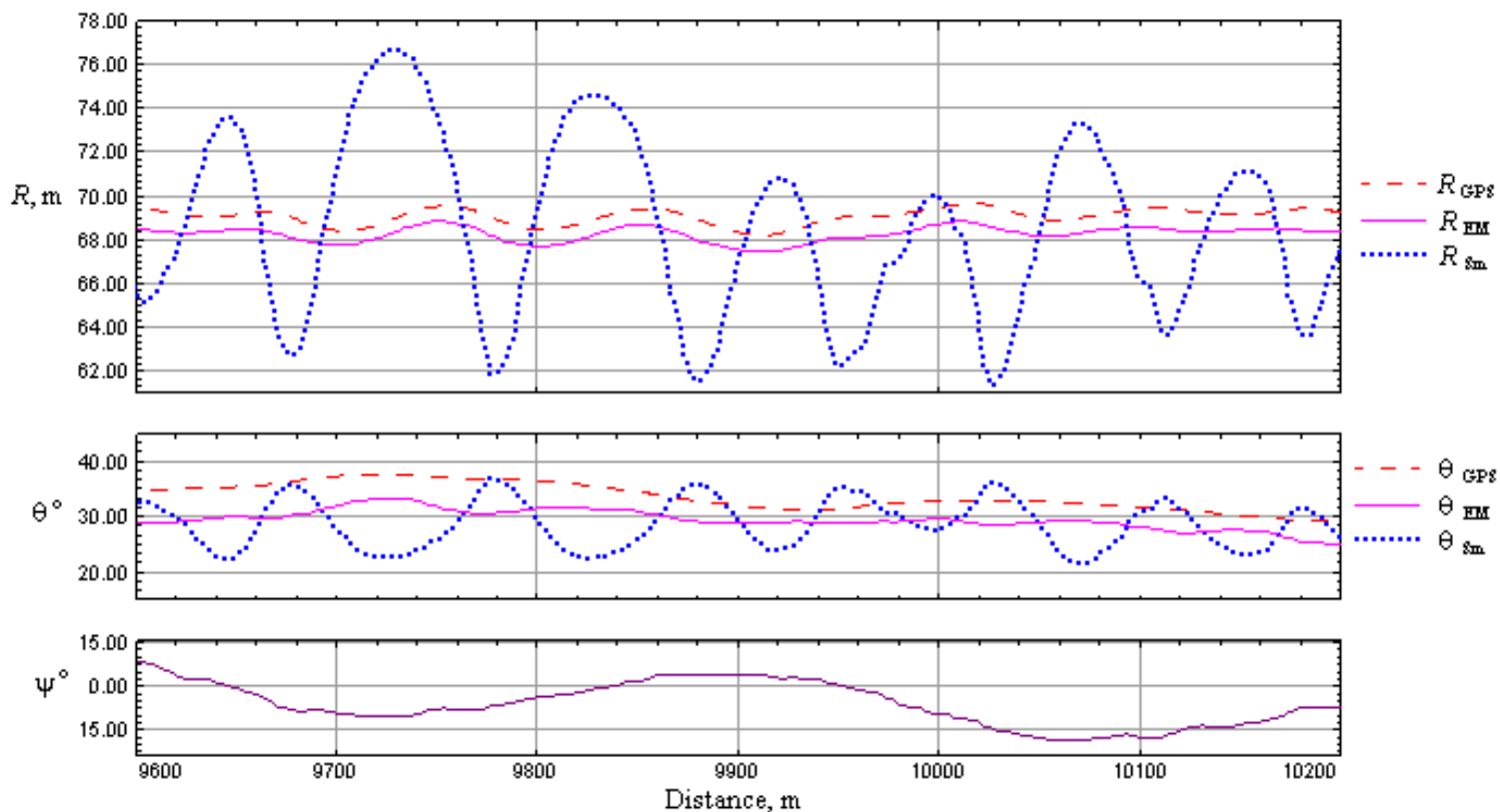


РЕШЕНИЕ
ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ
ПО ИЗМЕРЕНИЯМ
ПАРАМЕТРОВ
ПЕРЕМЕННОГО
МАГНИТНОГО ПОЛЯ



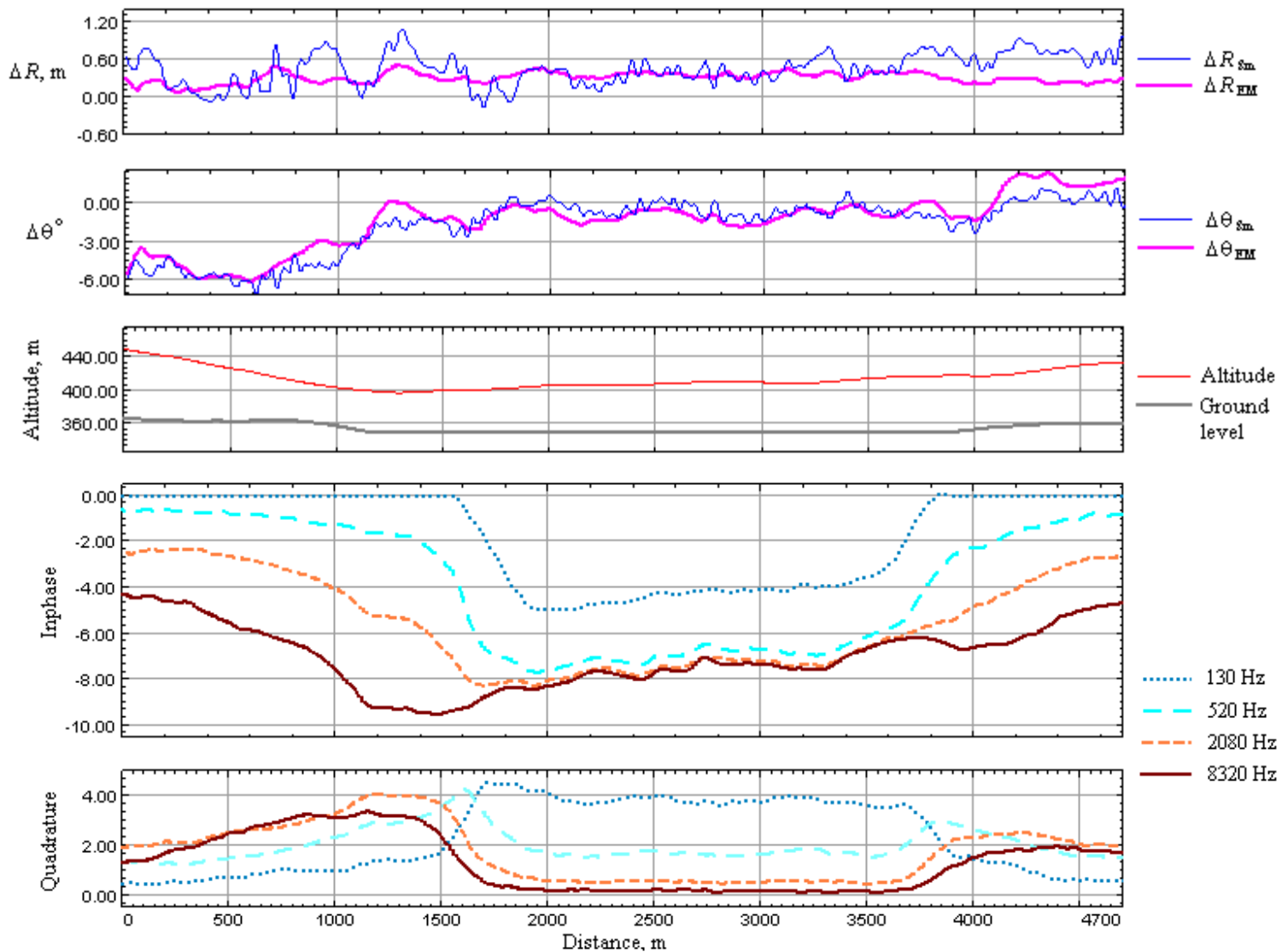


РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

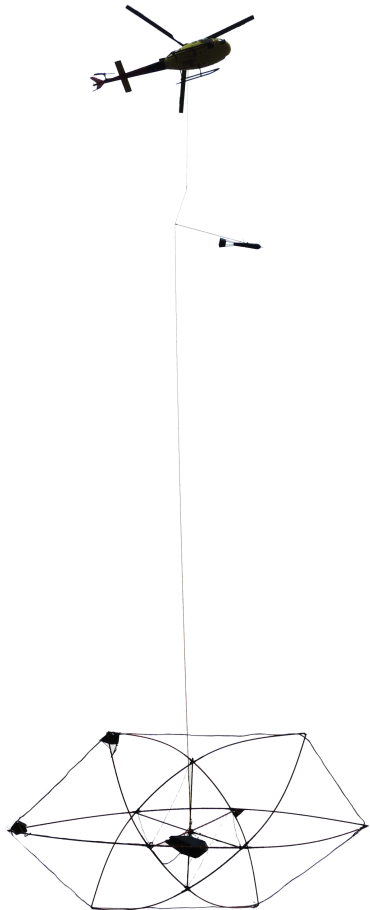




РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

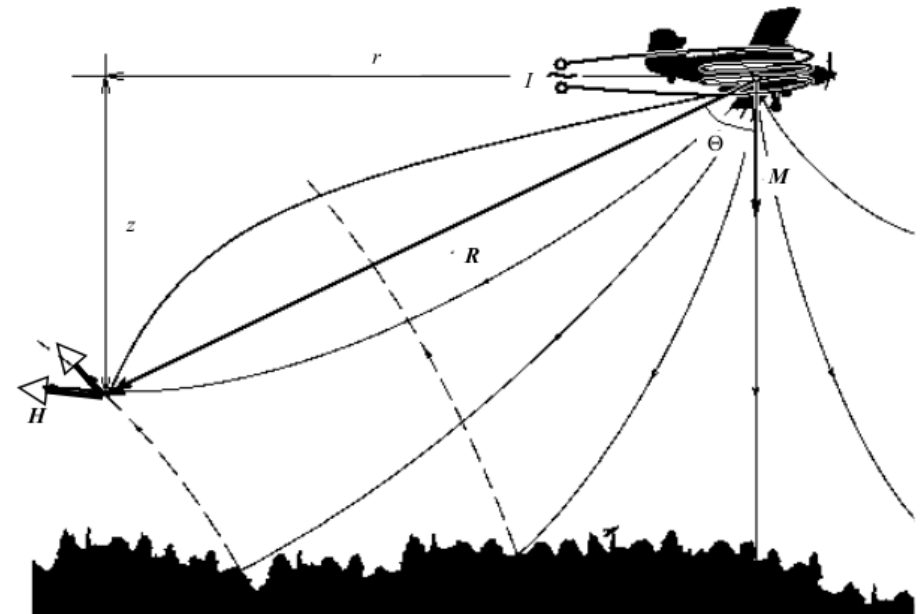


РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

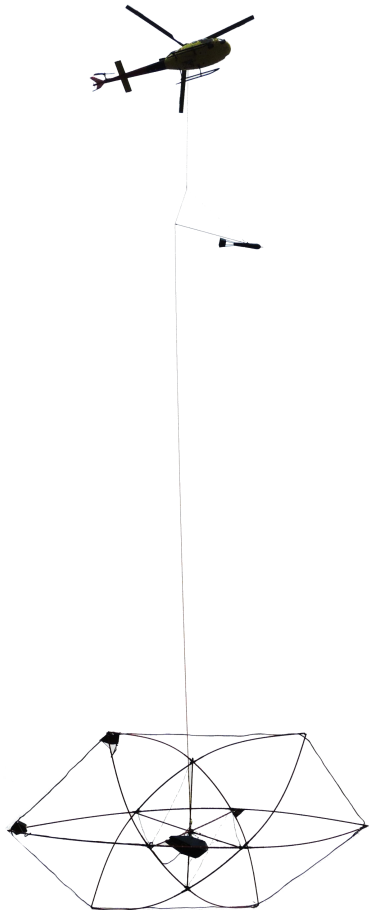


- 1 $\text{Re } H_z, \text{Im } H_z$
- 2 $|H_z|, 2h - z$
- 3 $\text{Re } H_z, 2h - z$
- 4 $\text{Im } H_z, 2h - z$
- 5 $\arg H_z, 2h - z$

МЕТОДЫ ДВУМЕРНЫХ ПАЛЕТОК

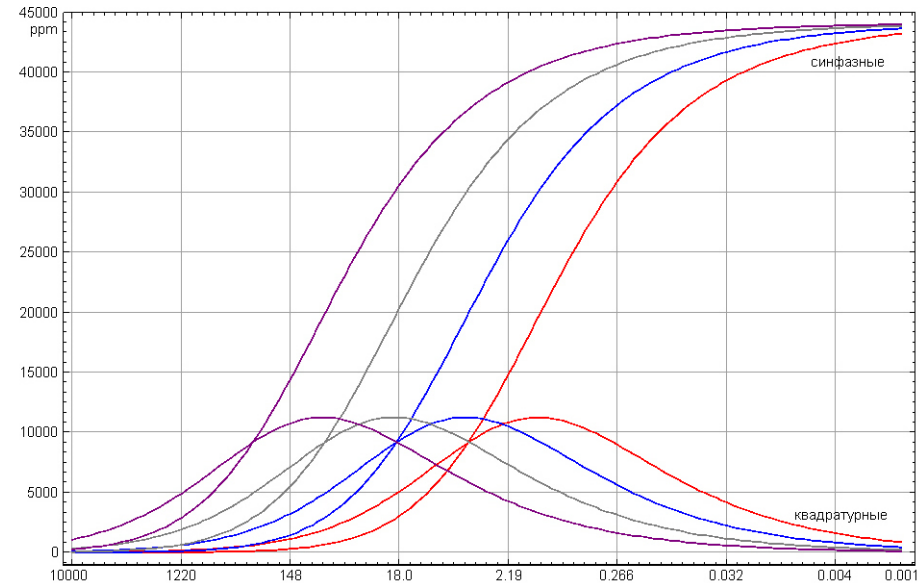


РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ



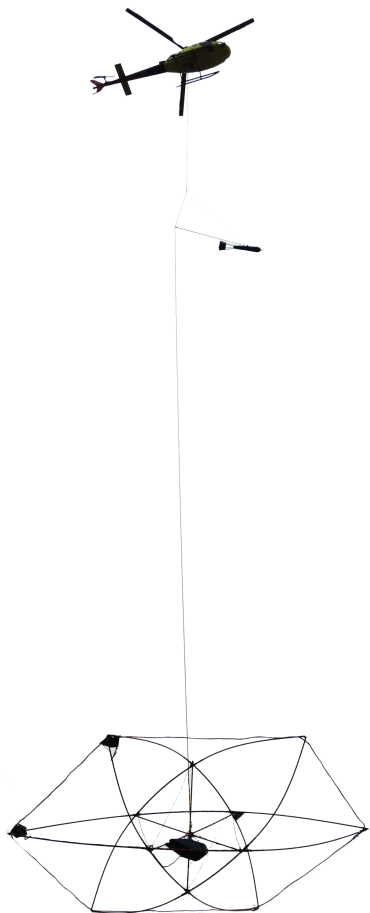
- 1 $\text{Re } H_z, \text{Im } H_z$
- 2 $|H_z|, 2h-z$
- 3 $\text{Re } H_z, 2h-z$
- 4 $\text{Im } H_z, 2h-z$
- 5 $\arg H_z, 2h-z$

МЕТОДЫ ДВУМЕРНЫХ ПАЛЕТОК





РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ



1 $\operatorname{Re} H_z, \operatorname{Im} H_z$

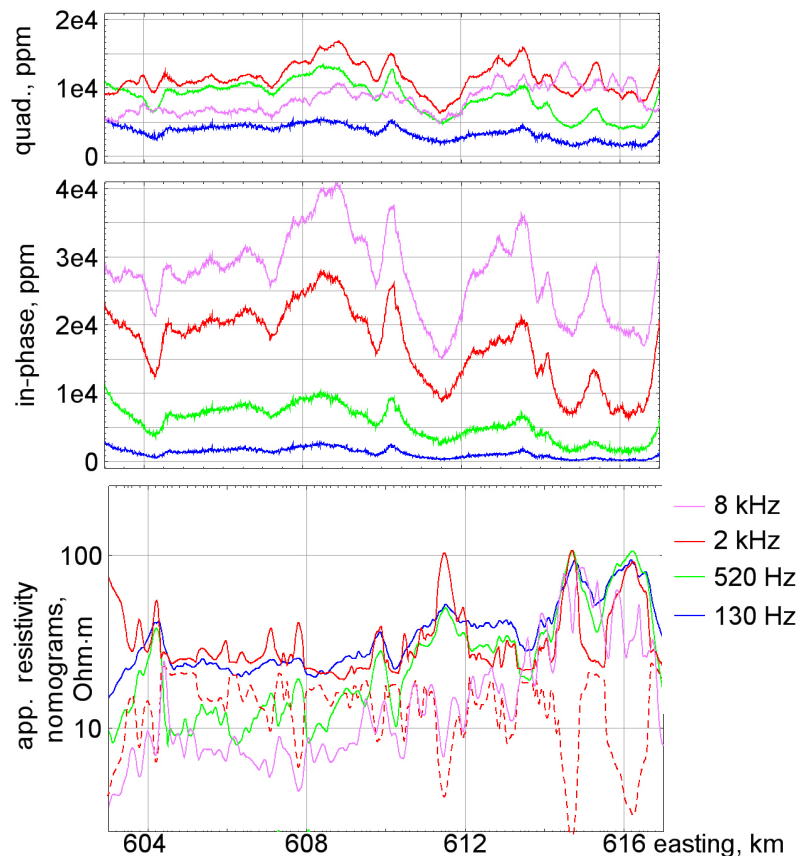
2 $|H_z|, 2h-z$

3 $\operatorname{Re} H_z, 2h-z$

4 $\operatorname{Im} H_z, 2h-z$

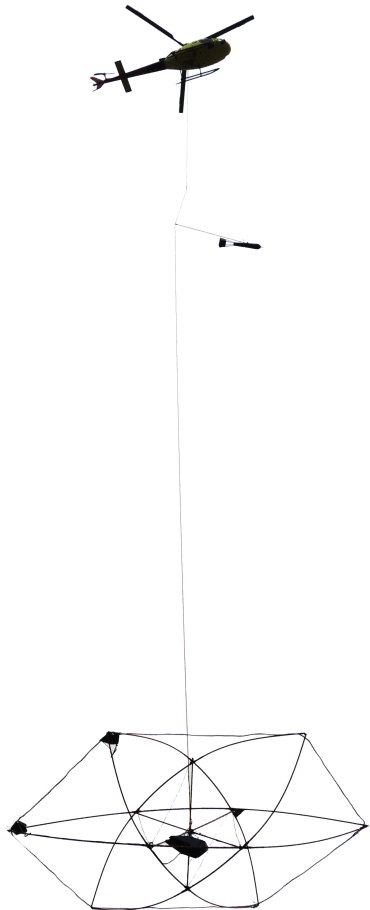
5 $\arg H_z, 2h-z$

МЕТОДЫ ДВУМЕРНЫХ ПАЛЕТОК



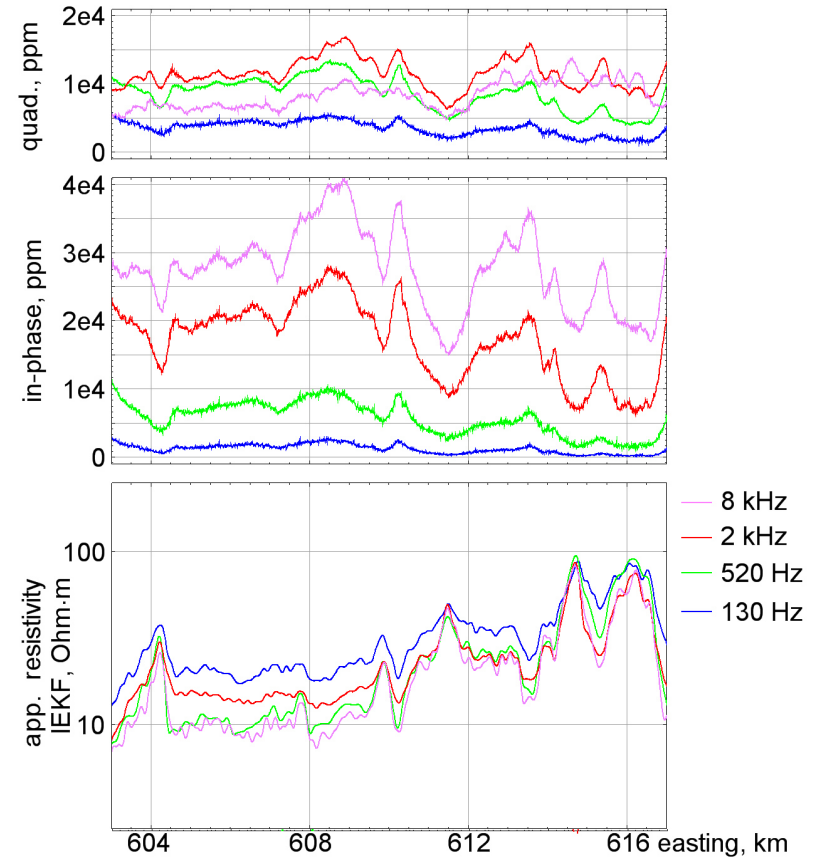


РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

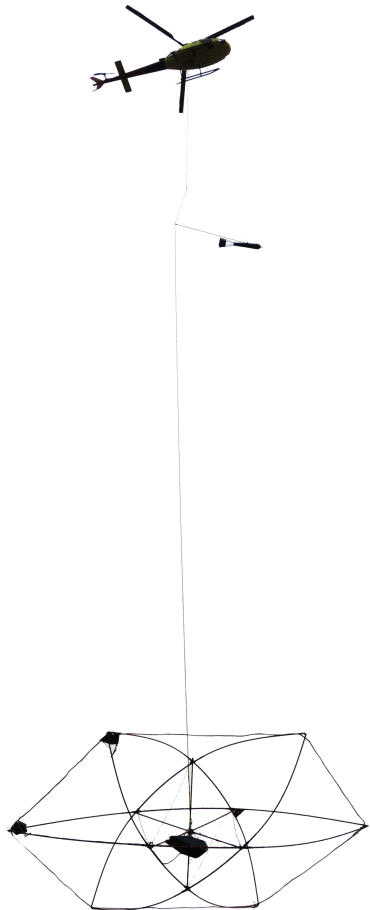


РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

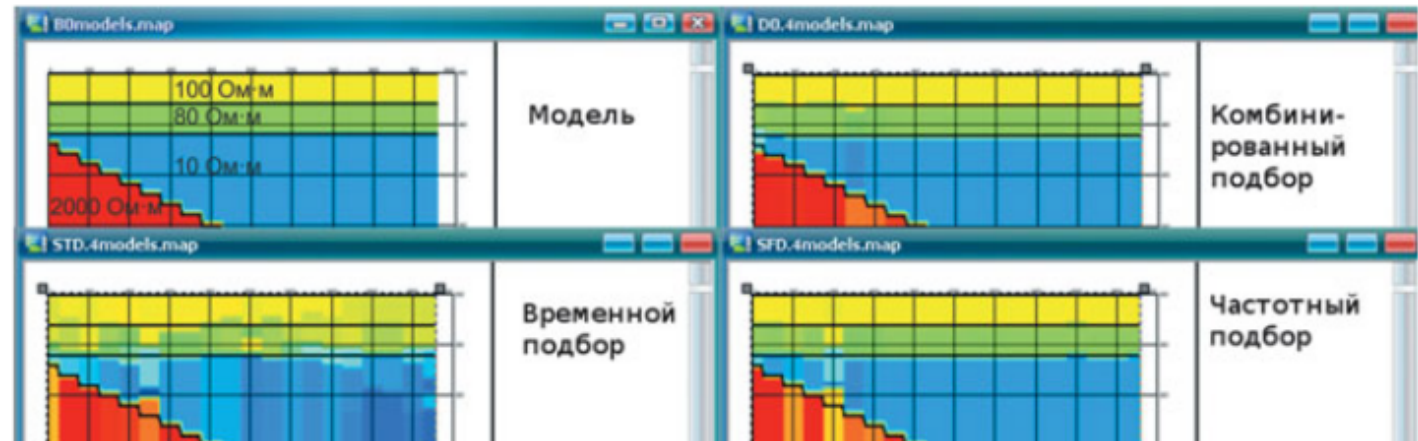
$\text{Re } H_z, \text{ Im } H_z, 2h-z, r$



РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

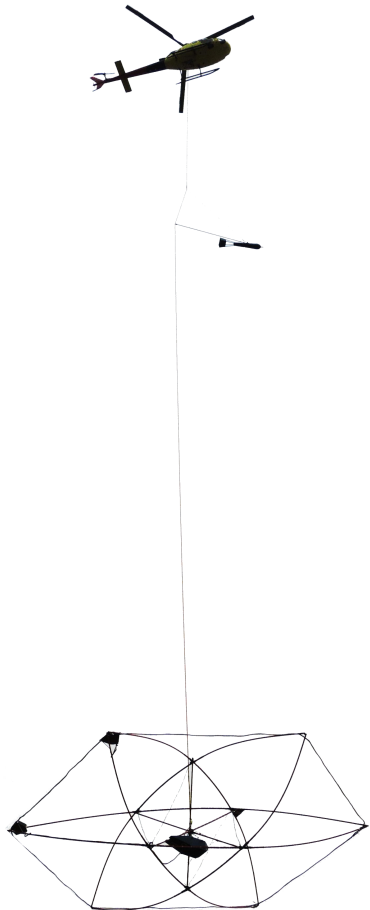


РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

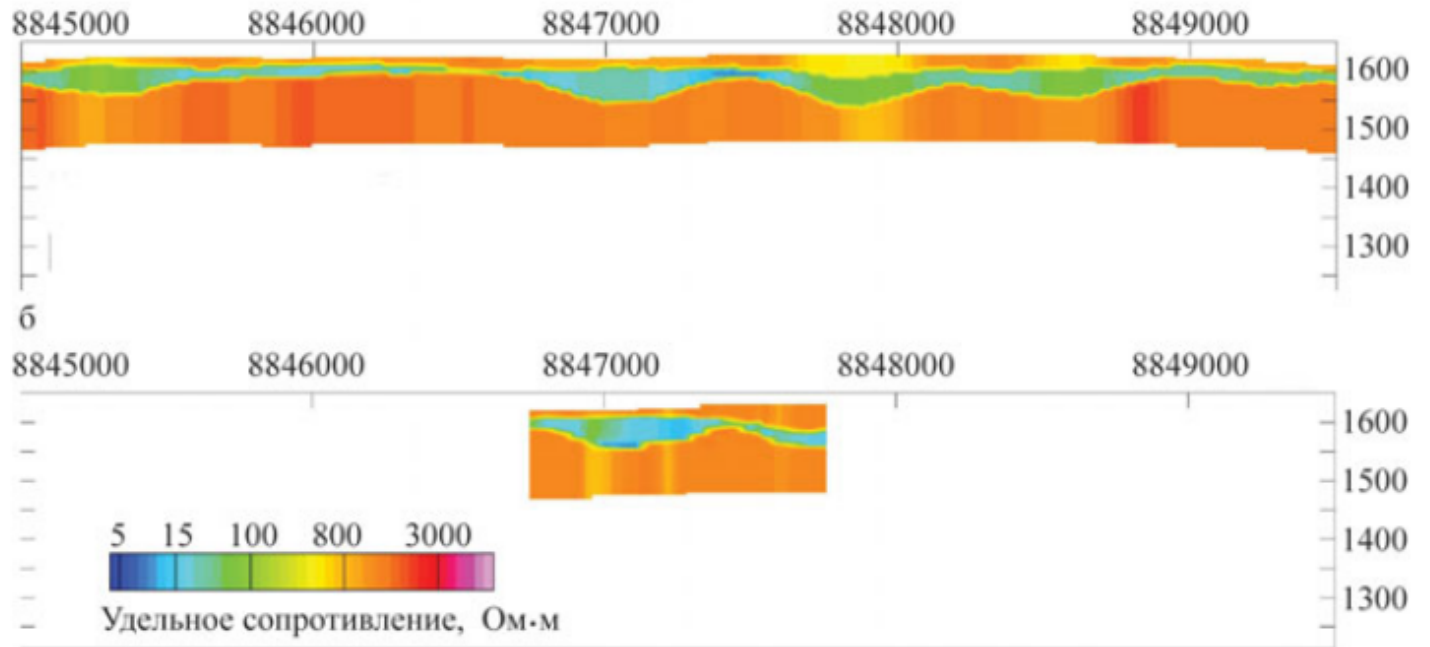


**Решение одномерной обратной задачи по модельным данным во
временной и частотной областях и при комбинированной обработке
временных и частотных данных**

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

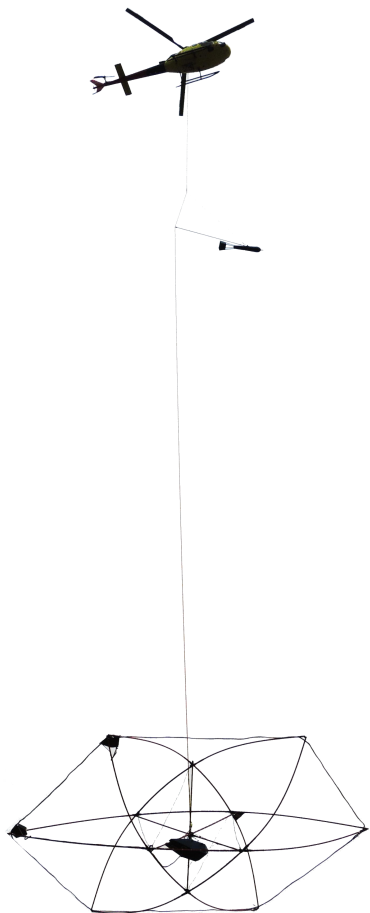


РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

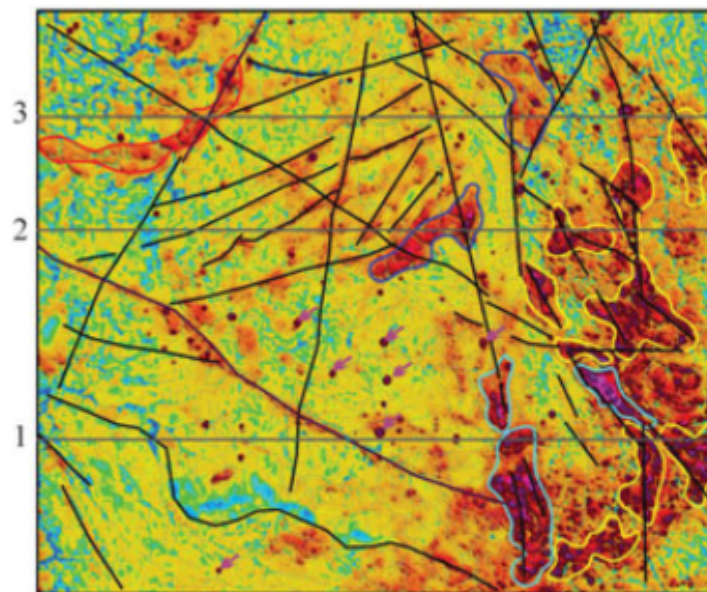


**Сравнение геоэлектрических разрезов, полученных с помощью:
а — аэрогеофизического комплекса «Экватор»; б — наземной
электроразведочной системы «Цикл-5». Вертикальные оси на разрезах —
абсолютная высота, м; горизонтальные оси — условное расстояние, м**

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ



РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ



5000 0 5000 15000 м

3 8 11 12 13 15 23 35 52 70

dH, м

Возможный генезис пород,
перекрывающих скальное основание

- 3  Рыхлые отложения в русле палеодолины
- 2  Рыхлые отложения в гидродинамических ловушках предгорных областей
- 1  Рыхлые отложения в руслах современных водотоков
-  Рыхлые отложения, связанные с водораздельными корами выветривания по гранитогнейсам
-  Кратерные фации трубок взрыва, представленные грубообломочными и песчано-глинистыми отложениями

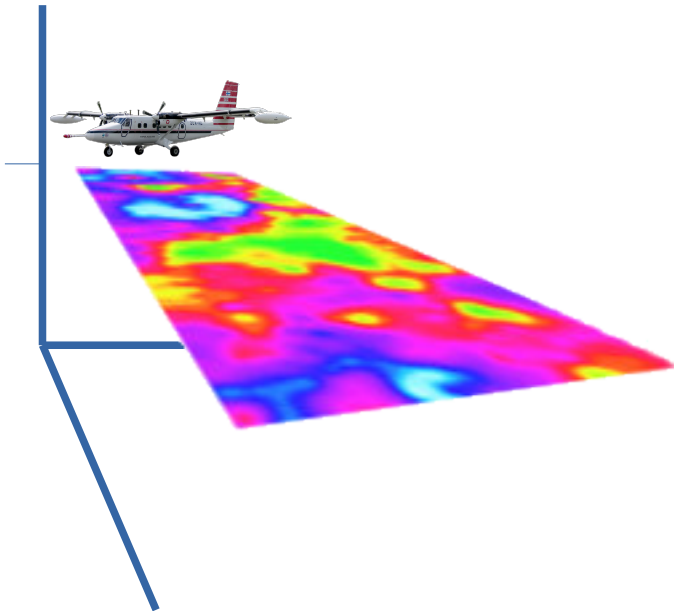
Карта значений глубины до кровли скального основания (dH), построения по результатам 1D-инверсии всех профильных данных



РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА ПОЛЯ

$$\vec{B}(x, y, h)|_{h>0} \stackrel{!?}{\rightarrow} \vec{m}(x, y, z)|_{z\leq 0}$$

$$\vec{g}(x, y, h)|_{h>0} \stackrel{!?}{\rightarrow} \rho(x, y, z)|_{z\leq 0}$$



РЕШЕНИЕ
ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ:
ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ПАРАМЕТРОВ
ИСТОЧНИКА ПОЛЯ

Уравнение Лапласа и граничные условия:

$$\nabla^2 U = 0, \quad U(\vec{r}) = U_0(\vec{r}), \quad \vec{r} \in \Sigma$$

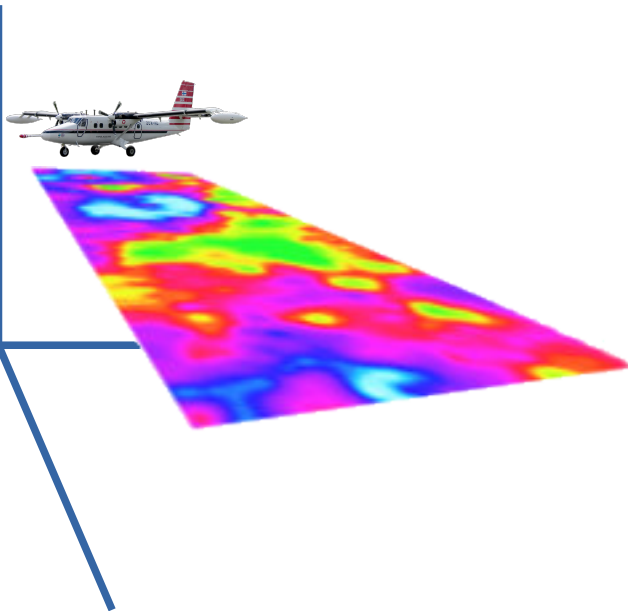
Решение с помощью функции Грина Γ :

$$U(\vec{r}) = \iint_{\vec{r}' \in \Sigma} \frac{\partial \Gamma(\vec{r}, \vec{r}')}{\partial \vec{n}} U(\vec{r}') ds(\vec{r}')$$

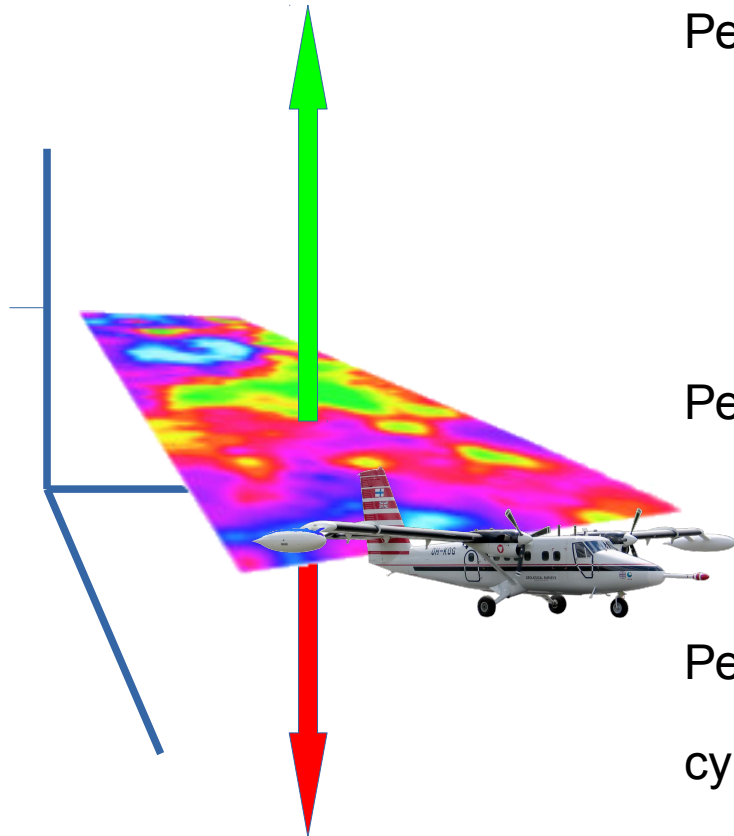
в приближении плоской Земли,
 Σ - плоскость $z = h = \text{const} > 0$:

$$U(\vec{r}) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \Psi(\vec{r} - \vec{r}') U(x', y', h) dx' dy'$$

$$\frac{\partial \Gamma(\vec{r}, \vec{r}')}{\partial \vec{n}} = \Psi(\vec{r} - \vec{r}')$$



РЕШЕНИЕ
ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ:
ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ПАРАМЕТРОВ
ИСТОЧНИКА ПОЛЯ



2D-преобразование Фурье:

$$\tilde{U}(k_x, k_y, z) = \iint_{-\infty}^{+\infty} e^{-i(k_x x + k_y y)} U(x, y, z) dx dy$$

Решение в частотной области:

$$\begin{aligned} \tilde{U}(k_x, k_y, z) &= e^{\omega(h-z)} \tilde{U}(k_x, k_y, h) \\ \tilde{\Psi}(k_x, k_y, z) &= e^{\omega(h-z)}, \quad \omega = \sqrt{(k_x^2 + k_y^2)} \end{aligned}$$

Решение для компонент поля:

$$\widetilde{\nabla U}(k_x, k_y, z) = e^{\omega(h-z)} \widetilde{\nabla U}(k_x, k_y, h)$$

Редукция поля вниз некорректна:

существование, единственность, **устойчивость**

РЕШЕНИЕ
ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ:
ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ПАРАМЕТРОВ
ИСТОЧНИКА ПОЛЯ

ТРЕБУЕТСЯ РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ

Суть всех методов: использование априорной информации

1. Детерминированные методы

Метод Тихонова:

$$\|AU|_{z=0} - U^{изм}|_{z=h}\|^2 + \alpha \Omega(U|_{z=0}) \rightarrow \min$$

$$AU|_{z=0} = U^{блч}|_{z=h}$$

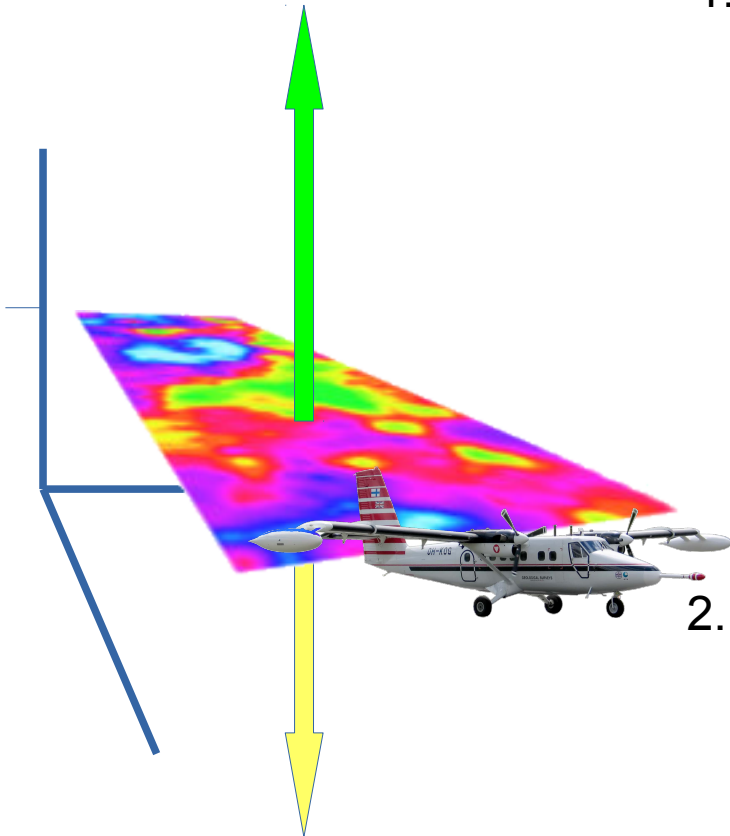
$$\|U\| = \iint U(x, y, z) dx dy$$

α – параметр регуляризации

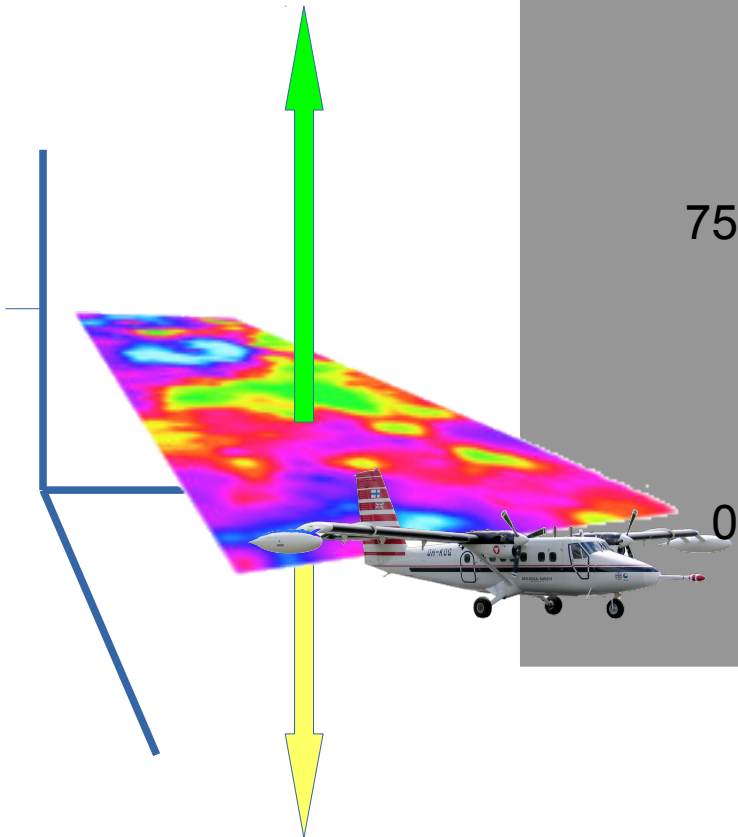
Ω – стабилизирующий функционал

2. Стохастический подход:

Стохастическая модель аномалий поля
и измерений

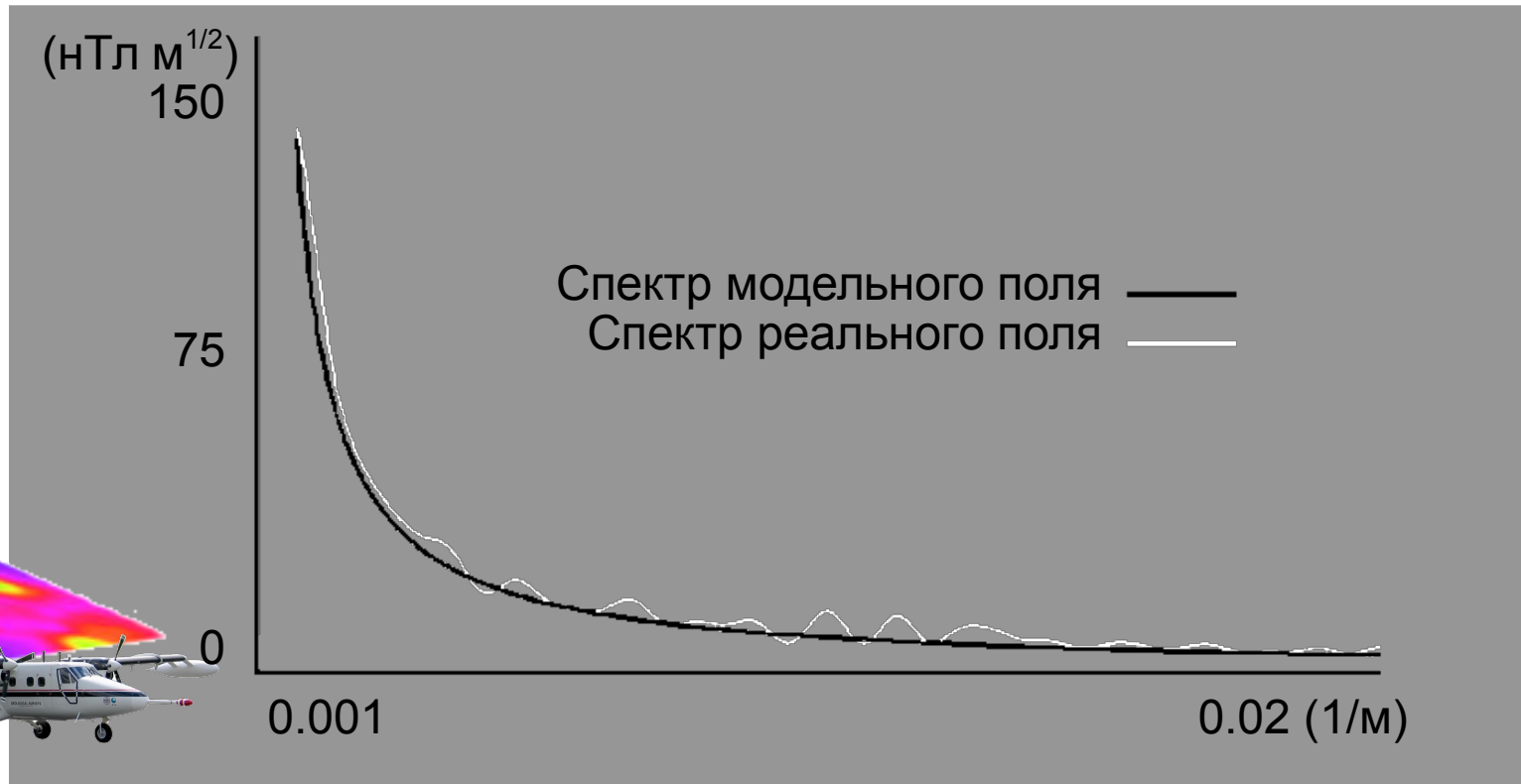


РЕШЕНИЕ
ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ:
ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ПАРАМЕТРОВ
ИСТОЧНИКА ПОЛЯ



Стохастический подход:

Стохастическая модель аномалий магнитного поля:
Марковская модель 3-го порядка





РЕШЕНИЕ
ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ:
ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ПАРАМЕТРОВ
ИСТОЧНИКА ПОЛЯ

МЕТОДЫ ИНВЕРСИИ:
традиционная регуляризация

Метод Гаусса-Ньютона

LCI
laterally constrained
inversion (Лев.-Марк.)

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}^+ &= \tilde{\mathbf{x}}^- + \\ & [\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} + \mathbf{S}^T \mathbf{S}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{H} \tilde{\mathbf{x}}^-) \\ \tilde{\mathbf{x}}_j^- &= \tilde{\mathbf{x}}_{j-1}^+ \\ \mathbf{S} &= \lambda \mathbf{I} \end{aligned}$$

VCI
vertically constrained
inversion (рег. Тихонова)

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}^+ &= \tilde{\mathbf{x}}^- + \\ & [\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} + \mathbf{D}^T \mathbf{D}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{H} \tilde{\mathbf{x}}^-) \\ \tilde{\mathbf{x}}^- &= 0 \\ \mathbf{D} &= \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} 1/\delta h_1 & -1/\delta h_1 & & & & \\ 1/\delta h_2^2 & -2/\delta h_2^2 & 1/\delta h_2^2 & & & \\ & \dots & & & & \\ & & & \dots & & \\ & & & & 1/\delta h_{N-1}^2 & -2/\delta h_{N-1}^2 & 1/\delta h_{N-1}^2 \\ & & & & & -1/\delta h_N & 1/\delta h_N \end{pmatrix}$$

SVD
singular value
decomposition

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}^+ &= \tilde{\mathbf{x}}^- + \\ & [\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{H} \tilde{\mathbf{x}}^-) \\ \tilde{\mathbf{x}}^- &= 0 \\ \mathbf{R} &= \mathbf{I} \\ & [\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \rightarrow \mathbf{V} \mathbf{\Lambda}^{-1} \mathbf{U}^T \end{aligned}$$



РЕШЕНИЕ
ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ:
ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ПАРАМЕТРОВ
ИСТОЧНИКА ПОЛЯ

МЕТОДЫ ИНВЕРСИИ:
традиционная регуляризация

Метод Гаусса-Ньютона

LCI
laterally constrained
inversion (Лев.-Марк.)

$$\tilde{\mathbf{x}}^+ = \tilde{\mathbf{x}}^- + [\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} + \mathbf{S}^T \mathbf{S}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{H} \tilde{\mathbf{x}}^-)$$

VCI
vertically constrained
inversion (рег. Тихонова)

$$\tilde{\mathbf{x}}^+ = \tilde{\mathbf{x}}^- + [\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} + \mathbf{D}^T \mathbf{D}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{H} \tilde{\mathbf{x}}^-)$$

SVD
singular value
decomposition

$$\tilde{\mathbf{x}}^+ = \tilde{\mathbf{x}}^- + [\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{H} \tilde{\mathbf{x}}^-)$$

или Фильтр Калмана

$$\tilde{\mathbf{x}}^+ = \tilde{\mathbf{x}}^- + \mathbf{P}^- \mathbf{H}^T [\mathbf{R} + \mathbf{H} \mathbf{P}^- \mathbf{H}^T]^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{H} \tilde{\mathbf{x}}^-)$$

обеспечение вычислительной устойчивости

$$\mathbf{P} = \mathbf{S}^T \mathbf{S} \text{ или } \mathbf{P} = \mathbf{L}^T \mathbf{D} \mathbf{L} \text{ (} \mathbf{P} = \mathbf{U}^T \mathbf{D} \mathbf{U} \text{)}$$



НАШИ ПЕРСПЕКТИВЫ





НАШИ ПЕРСПЕКТИВЫ

Задача навигации в постоянном или переменном магнитном поле вблизи источника:

использование магнитоградиентных измерений, применение для сближения и стыковки, автоматическая посадка, взаимное позиционирование членов группы, . . .





НАШИ ПЕРСПЕКТИВЫ

Задача навигации в постоянном или переменном магнитном поле вблизи источника:

использование магнитоградиентных измерений, применение для сближения и стыковки, автоматическая посадка, взаимное позиционирование членов группы, . . .

Задача автономной навигации:

коррекция навигационных параметров ИНС по измерениям постоянного и переменного магнитного поля для движущихся объектов, использование параметров среды как навигационного поля, . . .





НАШИ ПЕРСПЕКТИВЫ

Задача навигации в постоянном или переменном магнитном поле вблизи источника:

использование магнитоградиентных измерений, применение для сближения и стыковки, автоматическая посадка, взаимное позиционирование членов группы, . . .

Задача автономной навигации:

коррекция навигационных параметров ИНС по измерениям постоянного и переменного магнитного поля для движущихся объектов, использование параметров среды как навигационного поля, . . .

Решение обратных задач и задач оценивания:

применение анизотропийных оценщиков, определение параметров намагниченности объектов, определение физических свойств среды в трехмерном случае — оконтуривание грунтовых вод, рудных тел, . . .





НАШИ ПЕРСПЕКТИВЫ

Задача навигации в постоянном или переменном магнитном поле вблизи источника:

использование магнитоградиентных измерений, применение для сближения и стыковки, автоматическая посадка, взаимное позиционирование членов группы, . . .

Задача автономной навигации:

коррекция навигационных параметров ИНС по измерениям постоянного и переменного магнитного поля для движущихся объектов, использование параметров среды как навигационного поля, . . .

Решение обратных задач и задач оценивания:

применение анизотропийных оценщиков, определение параметров намагничивания объектов, определение физических свойств среды в трехмерном случае — оконтуривание грунтовых вод, рудных тел, . . .

Управление пилотируемыми и беспилотными системами:

трехмерная навигация с использованием цифровых моделей, адаптивная система управления, . . .



НАШИ ПЕРСПЕКТИВЫ

Задача навигации в постоянном или переменном магнитном поле вблизи источника:

использование магнитоградиентных измерений, применение для сближения и стыковки, автоматическая посадка, взаимное позиционирование членов группы, . . .

Задача автономной навигации:

коррекция навигационных параметров ИНС по измерениям постоянного и переменного магнитного поля для движущихся объектов, использование параметров среды как навигационного поля, . . .

Решение обратных задач и задач оценивания:

применение анизотропных оценивателей, определение параметров намагничения объектов, определение физических свойств среды в трехмерном случае — оконтуривание грунтовых вод, рудных тел, . . .

Управление пилотируемыми и беспилотными системами:

трехмерная навигация с использованием цифровых моделей, адаптивная система управления, . . .

Разработка новых систем:

новые магнитоградиентные системы для целей навигации и геофизики, новые магнитные датчики, новые γ -спектрометры, . . .

ПУБЛИКАЦИИ 2013-2018

Волковицкий А.К., Гольдин Д.А., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Принципы построения, структуры и алгоритмы аэроэлектроразведочных комплексов: монография в двух частях. Часть 1. Состояние, проблемы и теоретические основы. 1-е изд. М.: ИПУ РАН, 2013. – 142 с.

МОНОГРАФИИ

Волковицкий А.К., Гольдин Д.А., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Принципы построения, структуры и алгоритмы аэроэлектроразведочных комплексов: монография в двух частях. Часть 2. Пути и методы реализации. 1-е изд. М.: ИПУ РАН, 2013. – 114 с.

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Магнитоградиентные измерительные системы и комплексы. Монография в двух томах. Принципы измерений и структура магнитоградиентных комплексов. Том I. М.: ИПУ РАН, 2018. – 149 с.

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В., Тхоренко М.Ю. Магнитоградиентные измерительные системы и комплексы. Монография в двух томах. Обработка информации и применение магнитоградиентных комплексов. Том II. М.: ИПУ РАН, 2018. – 135 с.





ПУБЛИКАЦИИ 2013-2018

СТАТЬИ WoS/Scopus



Вовенко Т.А., Волковицкий А.К., Павлов Б.В., Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю. The models and structure of onboard measurements of three-dimensional physical fields // Automation and Remote Control. 2017. Vol. 78, № 6. С. 1115-1127.

Каршаков Е.В., Подмогов Ю.Г., Керцман В.М., Мойланен Е.В. Combined Frequency Domain and Time Domain Airborne Data for Environmental and Engineering Challenges // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 2017. Vol. 22, № 1. С. 1-12.

Тхоренко М.Ю. Algorithm for calibration of the electromagnetic positioning system // Automation and Remote Control. 2016. Vol. 77, № 4. С. 687-696.

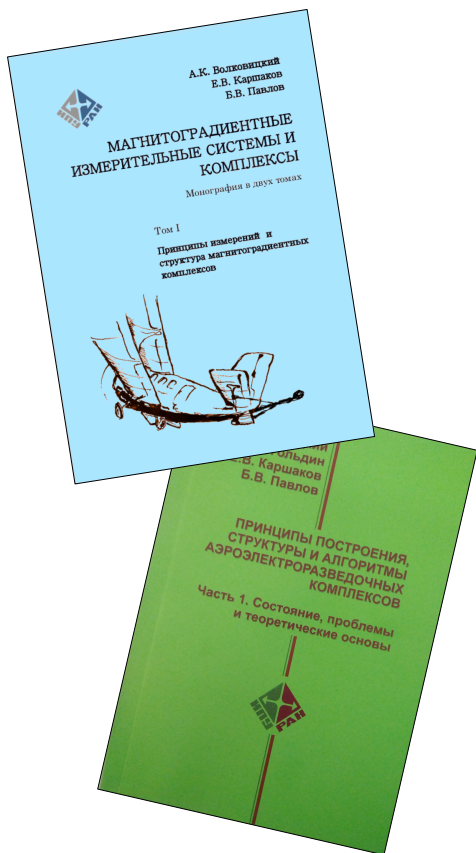
Тхоренко М.Ю., Каршаков Е.В., Павлов Б.В., Козлов А.В. Algorithm to Position an Object Moving in the Low-Frequency Electromagnetic Field // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76, № 11. С. 2033-2044.

Мойланен Е.В., Пушкарев П.Ю. Induction Sounding of the Earth's Mantle at a New Russian Geophysical Observatory // Acta Geophysica. 2014. № 11. С. <http://link.springer.com/article/10.2478/s11600-014-0245-2>



ПУБЛИКАЦИИ 2013-2018

СТАТЬИ ВАК



Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю., Павлов Б.В. Применение магнитоградиентометров для управления магнитным полем подвижного объекта // Проблемы управления. 2017. № 2. С. 68-72.

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В., Тхоренко М.Ю. Магнитоградиентные измерения в задачах обнаружения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2 (175). С. 169-178.

Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю., Павлов Б.В. Аэромагнитная градиентометрия и ее применение в навигации // Проблемы управления. 2016. № 2. С. 72-80.

Вовенко Т.А., Волковицкий А.К., Павлов Б.В., Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю. Модели и структура бортовых измерений пространственных физических полей // Проблемы управления. 2015. № 3. С. 59-68.

Козак С.З., Агеев В.В., Мойланен Е.В., Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю. Комплексирование наземной и вертолетной электроразведки методом переходных процессов при выделении участков, перспективных для бурения на воду (на примере Якутии) // Инженерные изыскания. 2015. № 10-11. С. 42-45.

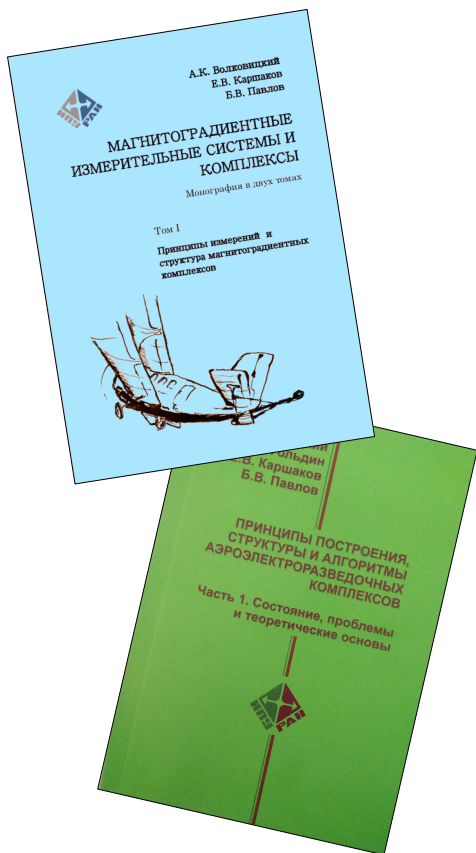
Подмогов Ю.Г., Каршаков Е.В., Керцман В.М., Мойланен Е.В. Применение современных аэрогеофизических технологий для детальных инженерно-геологических изысканий // Инженерные изыскания. 2015. № 12. С. 40-47.

Тхоренко М.Ю., Каршаков Е.В., Павлов Б.В., Козлов А.В. Алгоритм позиционирования подвижного объекта в низкочастотном электромагнитном поле // Автоматика и телемеханика. 2015. № 11. С. 160-173.



ПУБЛИКАЦИИ 2013-2018

СТАТЬИ ВАК



Павлов Б.В., Волковицкий А.К. Аэроэлектроразведочные измерительные комплексы и пути повышения их эффективности // Управление большими системами. 2015. № 54. С. 134-165.

Феликс Ж.Т., Каршаков Е.В., Мельников П.В., Ванчугов В.А. Результаты сопоставления данных аэро- и наземных электроразведочных систем, используемых при поисках кимберлитов в республике Ангола / Геофизика. М.: МОО ЕАГО, 2014. № 4. С. 17-22.

Волковицкий А.К., Вовенко Т.А., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Электромагнитная система относительного позиционирования в аэроэлектроразведочных комплексах // Датчики и системы. 2013. № 6. С. 44-52.

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Мойланен Е.В. Высокорастворимая аэроэлектроразведка в масштабе 1:5000 // Записки Горного института. 2013. Т. 200. С. 19-22.

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Позиционирование подвижных объектов в низкочастотном электромагнитном поле. Ч. 1. Базовый алгоритм относительного позиционирования // Проблемы управления. 2013. № 1. С. 57-62.

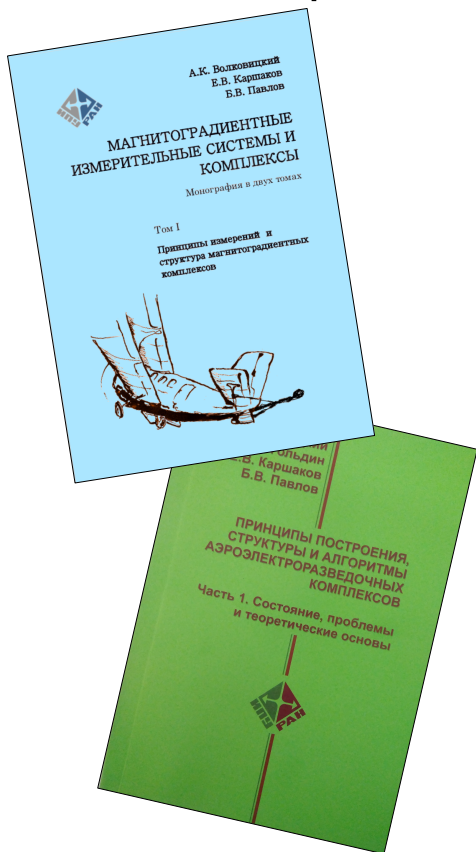
Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Позиционирование подвижных объектов в низкочастотном электромагнитном поле. Ч. 2. Особенности технической реализации // Проблемы управления. 2013. № 2. С. 58-64.

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Структура алгоритмов управления проводкой летательного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 217-225.



ПУБЛИКАЦИИ 2013-2018

ДОКЛАДЫ WoS/Scopus



Павлов Б.В., Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю. On calibration of a navigation system equipped with a magnetic gradiometer / Proceedings 24th Saint Petersburg International Conference in the IEEE Xplore Digital Library. СПб.: IEEE, 2017. С. 1-3.

Тхоренко М.Ю., Каршаков Е.В., Шевченко А.М. Nonlinear Algorithm for Navigation of a Moving Object in Magnetic Field / Proceedings of the 11th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences (ICNPAA World Congress 2016, La Rochelle). La Rochelle: AIP Publishing, 2017. Vol. 1798, № 1. С. 020143-1--020143-7 .

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В., Тхоренко М.Ю. A feedback in the aircraft's magnetic field control problem / Proceedings of 2016 International Conference Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy's Conference). М.: IEEE, 2016. С. 1-3.

ПУБЛИКАЦИИ

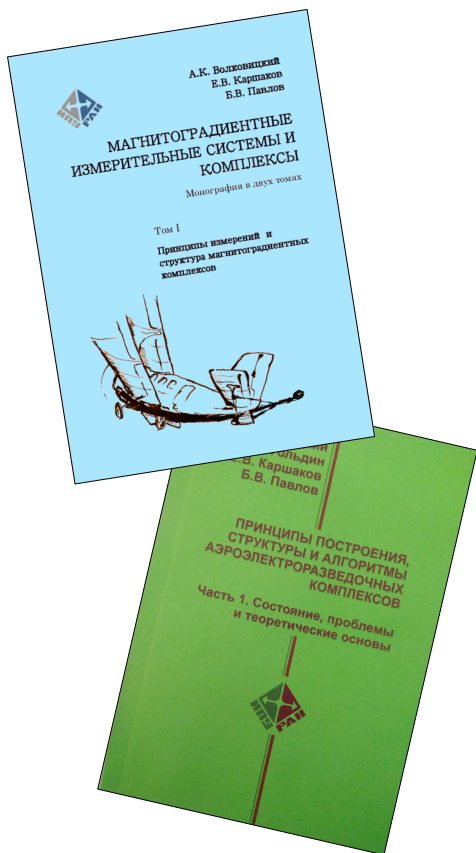
2013-2018

ДОКЛАДЫ

Доклады на конференциях:

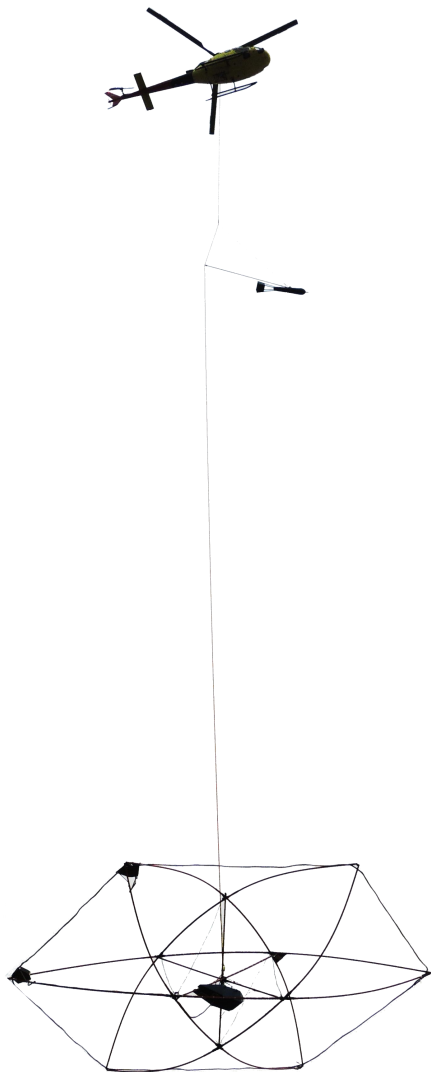
- Интегрированные навигационные системы (Санкт-Петербург)
- Конференция памяти Н.Н. Острякова (Санкт-Петербург)
- Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (Москва)
- Управление в морских и аэрокосмических системах (Санкт-Петербург)
- Перспективные системы и задачи управления
- Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (Санкт-Петербург)
- Всероссийское совещание по проблемам управления (Москва)

- Электромагнитные зондирования Земли
- Гоевразия (Евроазиатское геофизическое общество)
- Инженерная и рудная геофизика (Европейская Ассоциация Геоинженеров)
- South African Geophysical Association Conference (ЮАР)
- Airborne Electromagnetics
- Prospectors and Developers Association of Canada Conference (Канада)



МОЛОДЕЖНАЯ ШКОЛА





ОБРАБОТКА БОРТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЗАДАЧАХ НАВИГАЦИИ И ГЕОФИЗИКИ

Спасибо за внимание!