

Современные технологии инерциальной и спутниковой навигации в бескарданной аэрогравиметрии

[А.А. Голован](#), В.С. Вязьмин, Ю.В. Болотин

Лаборатория управления и навигации
МГУ имени М.В. Ломоносова

48-е заседание Международного научного семинара им. Д.Г.Успенского – В.Н.Страхова
Санкт-Петербург, 24-28 января 2022 г.

- О Лаборатории управления и навигации МГУ
- **Аэрогравиметрия** на основе **платформенных** гравиметров
 - Аэрогравиметры компании «Гравтехнологии» (ГТ) и навигационные технологии
 - Сотрудничество с «Аэрогеофизикой», Институтом физики Земли РАН, ГТ, Canadian Micro Gravity
- **Новое** направление – **бескарданная** аэрогравиметрия
 - Обзор современных бескарданных гравиметров
 - Навигационные технологии в алгоритмах обработки измерений
 - Сотрудничество с «Аэрогеофизикой», ГТ, Датским университетом
- Выводы, перспективы

- Год основания - 1987 г.

Создана по прямому заказу предприятий приборостроительной отрасли промышленности СССР для задач космической навигации и управления.

- Направления научно-исследовательских и практических работ
 - **Инерциальная, спутниковая** навигация и приложения (в промышленности)
 - Аэрогравиметрия (с 1995 г.). Декабрь 1995-январь1996 г. **Первые** аэрогравиметрические **полеты** на вертолете (**Институт физики Земли РАН**)
- Лекции для инженеров, в том числе по комплексной обработке аэрогравиметрической информации.

- Разработано **программное обеспечение** к аэрогравиметрам:
 - «Гравитон» (ВНИИГеофизика, Аэрогеофизика 1995 г.)
 - «АГК» (МИЭА, 1996 г.)
 - **GT-1A, GT-2A** (ЗАО «Гравтехнологии», 2002 г.)
- Сотрудничество с 2000-х гг. с GT, «Аэрогеофизикой», ИФЗ РАН и др.
- Ведется **разработка** алгоритмов **бескарданной** аэрогравиметрии и ПО для
 - GT-X (2010г.)
 - iMar (iCorus) 2020 г.
 - **макета** бескарданного гравиметра **GT**

- С 2002 г. на рынке представлен аэрогравиметр **GT1A (GT2A)**
- GT2A используется в съемках на всех континентах.
- Лабораторией ведется **поддержка и развитие** разработанного ПО.
- Участие в **экспериментальных** работах с макетным образцом бескарданного аэрогравиметра **GT-X** (2010 г.) (на яхте)



Уравнение движения чувствительной массы гравиметра в проекции на географическую вертикаль

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = \frac{dV_{up}}{dt} = \underbrace{\frac{V_E}{R_E} + \frac{V_N}{R_N} + 2uV_E \cos \varphi}_{\text{поправка Этвеша}} + \underbrace{f_{up}}_{\text{гравиметр}} - \underbrace{g^n}_{\text{нормальная сила тяжести}} + \underbrace{\delta g}_{\text{аномалия}} .$$

- λ, φ, h – долгота, широта, высота;
- V_E, V_N, V_{up} – восточная, северная, вертикальная составляющие скорости;
- u – модуль угловой скорости вращения Земли;
- R_E, R_N – радиусы кривизны (долготный, широтный).

Общая формулировка задачи аэрогравиметрии

- осуществить моделирование основного гравиметрического уравнения при помощи
 - аппаратных средств гравиметрического комплекса;
 - комплексной обработки информации;
- осуществить оценивание неизвестной скалярной функции $\delta g(\lambda, \varphi, h)$.

Приборная (реалистичная) модель основного гравиметрического уравнения

$$\ddot{h}' = \dot{V}'_{up} = \underbrace{\frac{V'_E}{R_E} + \frac{V'_N}{R_N} + 2uV'_E \cos \varphi'}_{\text{ГНСС}} + \underbrace{f'_{up}}_{\text{"гравиметр"}} - \underbrace{g'^n}_{\text{ГНСС}} + \underbrace{\delta g}_{\text{аномалия?}}.$$

- $\lambda', \varphi', h', V'_E, V'_N, V'_{up}$ – решения ГНСС;
- f'_{up} – “измерения гравиметра” – решения ИНС-ГНСС.
- Модель измерений гравиметра (GT-2A)

$$\underbrace{\tau \dot{f}'_{up} + f'_{up}}_{\text{модель с запаздыванием}} = f_{up} + \alpha_2 f_{z_1} - \alpha_1 f_{z_2} + k_2 f_{z_1} - k_1 f_{z_2} + k_3 f_{up} + \Delta f_{up}^0 + \Delta f_{up}^s.$$

- α_1, α_2 – угловые ошибки горизонтирования гироскопов;
- k_1, k_2 – ошибки юстировки гравиметра;
- k_3 – погрешность масштабного коэффициента;
- $\Delta f_{up}^0, \Delta f_{up}^s$ – смещение нулевого сигнала и шумовая составляющая.

$$\ddot{h}' = \dot{V}'_{up} = \underbrace{\frac{V'_E}{R_E} + \frac{V'_N}{R_N} + 2uV'_E \cos \varphi}_{\text{ГНСС}} + \underbrace{f'_{up}}_{\text{"гравиметр"}} - \underbrace{g'^n}_{\text{ГНСС}} + \underbrace{\delta g}_{\text{аномалия?}} .$$

- **Экспресс-диагностика** данных (контроль целостности)
- ————— Собственно инерциально-спутниковая часть —————
- Задачи **спутниковой навигации**: определение λ' , φ' , h' , V'_E , V'_N , V'_{up} при помощи первичных данных ГНСС: **кодовых**, **доплеровских**, **фазовых** многочастотных измерений .
- Задачи **интеграции** инерциальной навигационной системы (ИНС) с данными ГНСС: оценивание α_1 , α_1 ошибок горизонтирования; оценивание **погрешностей** инерциальных датчиков;

$$\ddot{h}' = \dot{V}'_{up} = \underbrace{\frac{V'_E}{R_E} + \frac{V'_N}{R_N} + 2uV'_E \cos \varphi}_{\text{ГНСС}} + \underbrace{f'_{up}}_{\text{"гравиметр"}} - \underbrace{g'^n}_{\text{ГНСС}} + \underbrace{\delta g}_{\text{аномалия?}} .$$

- ----- Собственно гравиметрическая часть -----
- Решение **основного** уравнения аэрогравиметрии
 - Оценивание аномалии силы тяжести на траектории полета
 - Оценивание **калибровочных** параметров гравиметра
- **Построение карт** аномалий по результатам обработки всех полетов.

Две составные части (**самодостаточного**) ПО постобработки аэро(морской)гравиметрической информации (для платформенного аэрогравиметра GT2A)

- инерциально-спутниковая часть (**GTNav**);
- гравиметрическая часть (**GTGraf**).

Минимум настроечных параметров при обработке.

Никакое “**чужое**” программное обеспечение (е.g. **GrafNav**, **Inertial Explorer** (Waypoint, Novatel)) нами не используется.

Аэрогравиметр – бескарданная инерциальная навигационная система (БИНС).

- Состав БИНС – 3 акселерометра, 3 датчика угловой скорости;
- Термостабилизация;
- iMAR (Германия) – БИНС различных серий;
- iXblue (Франция), Honeywell (США), Litton (США) и др. . .

Преимущества перед традиционными гравиметрами:

- малый вес (<20 кг), компактны, малое энергопотребление;
- потенциальная возможность съемок с облетом рельефа.



- 2010 г. – работы с **прототипом** бескарданного гравиметра **GT-X** разработки «Гравтехнологии». Испытания на яхте.
- С 2019 г. – работы с прототипом нового бескарданного гравиметра (**GT-4**) этой же компании. Обработка экспериментальных данных первой аэросъемки (2021 г.)
- 2020 г. – научное взаимодействие с **Датским** техническим университетом. Обработка экспериментальных данных.
- С 2020 г. – сотрудничество с **«ГНПП «Аэрогеофизика»**. Обработка данных **нескольких** промышленных съемок.
- 2021 г. Участие в подготовке эксперимента на **БПЛА**, обработка экспериментальных данных.

Первичная информация.

- Параметры орбит:
 - **Эфемеридные параметры** (GPS, Galileo, Beidou, QZSS, IRSS).
 $T_{oe}, \Omega, i, \omega, a, e^2, \dots$
 - **Гринвичские** координаты η и скорости V_η (ГЛОНАСС).

При помощи этих параметров решается задача навигации спутников.

• Первичные измерения

- **Кодовые** псевдодальности: $Z_\rho^{(i)} = \rho + \dots$,
 ρ – дальность спутник-антенна приемника, i – номер спутника, точность – первые метры;
- **Доплеровские** псевдоскорости: $Z_{\dot{\rho}}^{(i)} = \dot{\rho} + \dots$, $\dot{\rho}$ – радиальная скорость, точность – первые сантиметры/сек;
- **Фазовые измерения** $Z_{\varphi_{L1}}^{(i)}, Z_{\varphi_{L2}}^{(i)}$ (L1 & L2). $Z_{\varphi_{L1}} = \frac{\rho}{\lambda_1} + N + \dots$,

λ_1 – длина волны ~ 20 см, N – неизвестное целое число, точность – первые сантиметры.

Ионосферно-свободная комбинация фазовых измерений для устранения ионосферной задержки.

Решаемые задачи.

- Определение **координат** антенны спутникового приемника: кодовые и/или фазовые измерения.
- Определение вектора **скорости** антенны спутникового приемника: доплеровские и/или фазовые измерения.
- Определение вектора **ускорения** антенны спутникового приемника: доплеровские и/или фазовые измерения.
- Определение **ориентации** (при использовании многоантенного спутникового приемника).
- Определение **квазиординат, квазикаурса** (при полетах в высоких (низких) широтах).

Режимы.

- **Автономный (стандартный)** режим – данные только самолетного приемника.
- **дифференциальный** режим – данные самолетного приемника и одной или нескольких базовых станций.

Мотивация.

- Не быть заложником чужих, неконтролируемых решений.
- Профессиональный интерес.
- Разработка софта именно под задачу аэрогравиметрии и под конечных пользователей.

Особенности разработки.

- **Максимально** простой интерфейс:
 - имена исходных измерительных файлов от самолетного приемника и/или базовых станций;
 - координаты базовой(ых) станций;
 - угол маски видимости спутников.
- **Глубокий** контроль целостности данных:
 - пропуски данных;
 - число видимых спутников;
 - статистика невязок решений;
 - флаги достоверности решений и т.п.

Оперативная поддержка, сопровождение и т.п.

Учет специфики задачи аэрогравиметрии

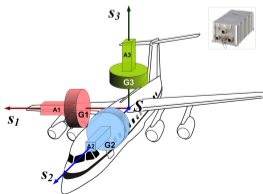
$$\ddot{h}' = \dot{V}'_{UP} = \dots + f'_{up} + \delta g.$$

- Двойное дифференцирование высоты h' для “сравнения” \ddot{h}' и f'_{up} с целью оценивания аномалии δg .
- Использование скоростного решения для вертикальной скорости V'_{UP} для того, чтобы сравнить с интегралом $\int f'_{UP} dt$.
- Сравнение высоты h' с двойным интегралом $\iint f'_{UP} dt^2$.
- Мы используем компромисный вариант: вертикальную скорость и первый интеграл от показаний гравиметра.
- Главное внимание обращаем на скоростные решения, а не на позиционные решения.
- Методы: наименьших квадратов, наименьших модулей, фильтр Калмана в варианте сглаживания.

Первичная информация - измерения инерциальных датчиков (300-400 гц):

- акселерометров: $f'_z = (f'_{z_1}, f'_{z_2}, f'_{z_3})^T$;
- гироскопов или датчиков угловой скорости (ДУС): $\omega'_z = (\omega'_{z_1}, \omega'_{z_2}, \omega'_{z_3})^T$.
- Задачи:
 - калибровка (при выпуске бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС));
 - экспресс-диагностика и контроль целостности данных;
 - начальная и конечная выставка БИНС;
 - расчет автономной и интегрированной (БИНС-ГНСС) навигации носителя (ЛА, вертолета, БПЛА) для параметризации основного гравиметрического уравнения

$$\ddot{h}' = \dot{V}'_{up} = \underbrace{\frac{V'_E}{R_E} + \frac{V'_N}{R_N} + 2uV'_E \cos \varphi}_{\text{ГНСС}} + \underbrace{f'_{up}}_{\text{"гравиметр"}} - \underbrace{g'^n}_{\text{ГНСС}} + \underbrace{\delta g}_{\text{аномалия?}}.$$



- **Ключевой** аспект бескарданной аэрогравиметрии – инерциально-спутниковые навигационные технологии.
- Лабораторией разработана **методика** проведения аэрогравиметрических съемок, **алгоритмы постобработки** данных. Продолжаются работы по совершенствованию.
- С 2020 г. было обработано более **50000 км** летных галсов.
- Обработка показала возможность определения аномалий силы тяжести в свободном воздухе с точностью лучше **1 мГал**.
- Лабораторией совместно с "Аэрогеофизикой" показана **применимость** бескарданного гравиметра для съемок с **облетом рельефа**.
- Лабораторией совместно с "Аэрогеофизикой" показана **применимость** бескарданного гравиметра для съемок на **БПЛА**.

Безусловно, бескарданная гравиметрия - это **будущее** аэро(морской) гравиметрии (которое делается уже сейчас).

Лаборатория всегда открыта для конструктивного сотрудничества!

Спасибо за внимание!