

УДК 528.223

**ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ БЕСШОВНОЙ
АССИСТИРУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ НАВИГАЦИИ В
ГНСС ГЛОНАСС НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ
ПАРАМЕТРОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

О.В. Денисенко¹, В.И. Пустовойт^{1,2}, И.С. Сильвестров¹, В.Ф. Фатеев¹

¹ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

²РАН, Москва,

denisenko@vniiftri.ru, igsilv@vniiftri.ru, vladpustovoi@gmail.com,

fateev@vniiftri.ru

В статье представлены результаты исследований проблем создания бесшовных комплексных систем навигации, включающих в свой состав бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС), НАП ГЛОНАСС, а также корреляционно-экстремальные системы навигации (КЭНС), использующие результаты измерения параметров гравитационного и магнитного полей Земли.

Ключевые слова: бесшовная система навигации, гравитационное и магнитное поля Земли, корреляционно-экстремальные системы навигации.

**DEVELOPMENT PROBLEMS OF SEAMLESS ASSISTING
NAVIGATION TECHNOLOGY IN GLONASS GNSS ON THE
BASIS OF MEASUREMENTS OF GEOPHYSICAL FIELD PA-
RAMETERS**

O.V. Denisenko¹, V.I. Pustovoi^{1,2}, I.S. Silvestrov¹, V.F. Fateev¹

¹FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region,

²RAS, Moscow,

denisenko@vniiftri.ru, igsilv@vniiftri.ru, vladpustovoi@gmail.com,

fateev@vniiftri.ru

The article presents the results of research on the problems of creating seamless complex navigation systems, including strapdown inertial navigation systems (SINS), GLONASS NUE, as well as correlation-extreme navigation systems (CENS), using the results of measuring the parameters of the Earth's gravitational and magnetic fields.

Key words: seamless navigation system, gravitational and magnetic fields of the Earth, correlation-extreme navigation systems.

Введение

Современные требования к надежности и обеспечению «бесшовной» навигации в условиях помех и недоступности сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) определяют необходимость разработки и исследования методов и средств комплексирования навигационной аппаратуры потребителя (НАП). Одним из направлений повышения помехозащи-

ценности навигационных решений является комплексирование НАП и корреляционно-экстремальной навигационной системы (КЭНС), работающей по гравитационному полю Земли (ГПЗ) и магнитному полю Земли (МПЗ) (рис. 1). Поскольку пространственные распределения характеристик ГПЗ и МПЗ для районов и маршрутов применения средств навигации уникальны и достаточно стабильны, то их текущие измеренные значения можно использовать для глобальной навигации. В статье представлены направления повышения надежности и оперативности НАП в сложных условиях приема сигналов ГНСС ГЛОНАСС на основе комплексирования с измерениями параметров ГПЗ и МПЗ.

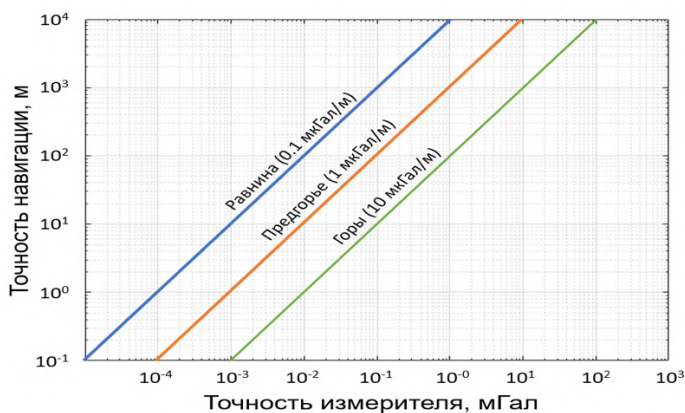


Рис. 1. Комплексная навигационная аппаратура потребителя с использованием параметров ГПЗ и МПЗ

Такие комплексные системы обладают более высокой устойчивостью и точностью в условиях, когда уровень сигналов ГНСС либо существенно снижается (в горных ущельях, туннелях, закрытых помещениях), либо пропадает полностью (под землей, под водой, в условиях помех).

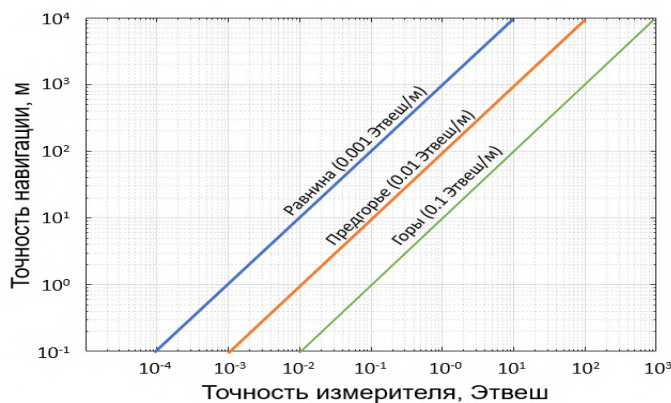
1. Оценка перспективной точности навигации по ГПЗ

Оценка требований к суммарной погрешности измерений и погрешности карты гравитационных градиентов для перспективной грави-КЭНС выполнена при серии из 100 измерений. Результаты представлены на рис. 2 а) и б).



Погрешность навигации	Требования к картам
1 м	от 0,001 мГал (равнина) до 0,1 мГал (горы)
1000 м	от 1 мГал (равнина) до 100 мГал (горы)

а)

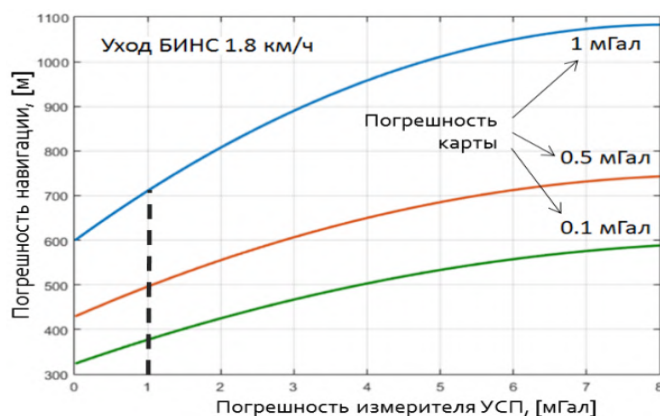


Погрешность навигации	Требования к картам
1 м	от 0,01 Е (равнины) до 1 Е (горы)
1000 м	от 10 Е (равнина) до 1000 Е (горы)

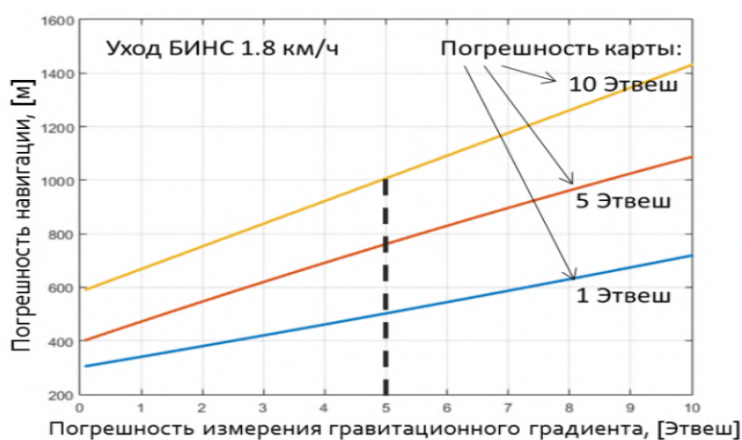
б)

Рис.2. К оценке погрешности навигации: а) при измерениях аномалий силы тяжести; б) при измерениях гравитационных градиентов

Моделирование точности КЭНС проведено по совместным измерениям аномалий силы тяжести и гравитационного градиента (БИНС + гравиметр + градиентометр). Результаты моделирования представлены на рис. 3 а) и б).



а)



б)

Рис. 3. Результаты моделирования точности КЭНС по совместным измерениям аномалий силы тяжести и гравитационного градиента (БИНС+гравиметр+градиентометр)

Оценка точности перемещения из исходной точки в фиксированную конечную точку траектории выполнена при движении по различным маршрутам с помощью модели комплексной системы навигации. Были выбраны 3 маршрута (рис. 4):

- 1) маршрут 1 (равнина): средний градиент УСП равен 0,5 мГал/км (слабо-аномальный район);
- 2) маршрут 2 (предгорье): средний градиент УСП равен 2,4 мГал/км (средне-аномальный район);

3) маршрут 3 (горы): средний градиент УСП равен 5 мГал/км (высоко-аномальный район).

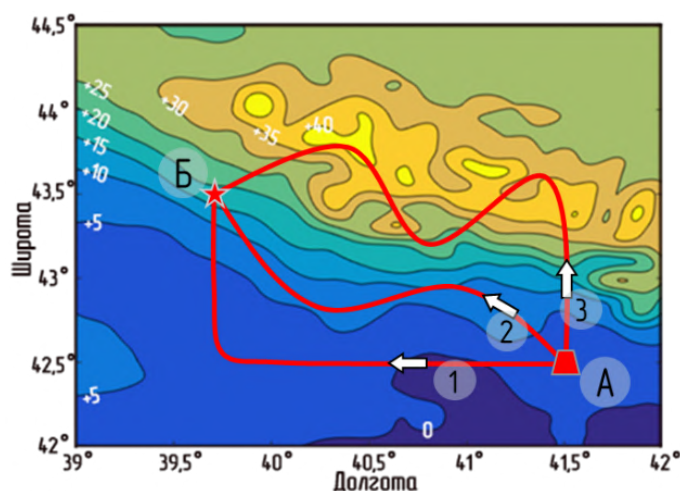


Рис.4. Карта УСП на которой производилось моделирование

Результаты моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Движение по маршрутам с различной изменчивостью УСП

Условия моделирования	Погрешность выхода в точку «Б»		
	Маршрут 1	Маршрут 2	Маршрут 3
уход БИНС не превышает 1,8 км/ч; погрешность измерителя УСП и карты составляет 0,1 мГал.	2280 м	700 м	490 м

Анализ табл. 1 показывает, что для обеспечения высокой точности навигации целесообразно выбирать движение по высоко аномальному маршруту.

2. Оценка перспективной точности навигации по МПЗ

Оценка перспективной точности навигации по МПЗ выполнена при следующих исходных данных:

- два типовых участка Атлантического океана размерами 250x500 км;
- интенсивность аномалий МПЗ от -800 нТл до +1200 нТл на уровне моря;
- интервал корреляции аномального поля - в пределах 15-30 км;
- магнитные помехи: влияние магнитных бурь - 120-150 нТл;
- суточные вариации собственного МПЗ 6-30 нТл.

Результаты моделирования представлены в табл. 2 и на рис. 5.

Таблица 2

Оценка перспективной точности навигации по МПЗ

Годы	2021 г.	2025 г.	2030 г.
Погрешность			
Погрешность определения местоположения, м	500	200	50
Требуемая погрешность измерения индукции МПЗ (магнитометр+карта), нТл	50-100	25-50	10

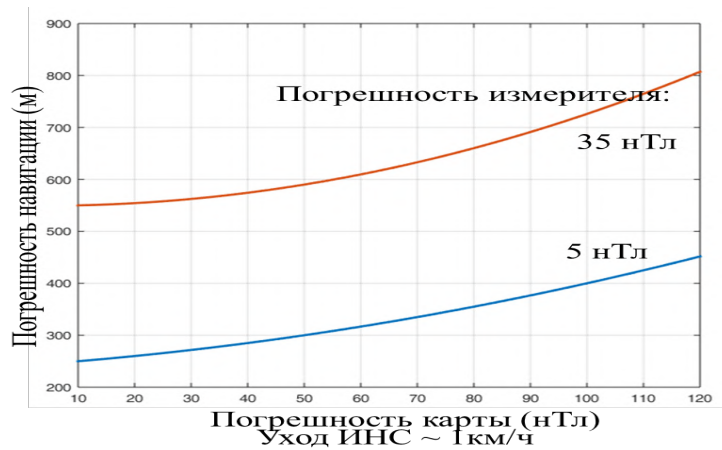


Рис. 5. К оценке перспективной точности навигации по МПЗ

На сегодняшний день существует большой парк магнитометров, точность которых доходит до 0,1 нТл, а быстродействие - до 1000 изм./с. Обзор некоторых известных магнитометров представлен на рис. 6.

Феррозондовые магнитометры		Квантовые магнитометры	
	<p>МАГ-03 Производитель: Vestington (Англия); Тип: феррозондовый; Точность: 0,1 нТл; Диапазон: 70 – 70 мкТл; Размеры сенсора: 2,5x20 см;</p>		<p>GT-MAG Производитель: ЗАО «Геотехнологии» (Россия, Москва); Тип: аэромагнитометр с возможностью подключения до 4-х квантовых датчиков и до 3-х феррозондовых; Разрешение: 0,002 нТл; Быстродействие: 1000 изм./1 с; Источник данных: сайт ЗАО «Геотехнологии»</p>
	<p>FRG-604RC Производитель: ИК-ФИА СО (Россия, Якутск); Тип: феррозондовый; Разрешение: 0,1 нТл; Быстродействие: 10 изм./1 с Диапазон измерений: 70–70 мкТл;</p>		<p>Аэромагнет-100 Производитель: ЗАО ГНПП Аэрогеофизика (Россия, Москва); Тип: двухканальный (возможно подключение до двух магнитных датчиков) аэромагнитометр; Диапазон измерений: 15–105 мкТл; Разрешение: 0,001 нТл; Быстродействие: 100 изм./1 с; Источник данных: сайт ЗАО «Аэрогеофизика»</p>
			<p>CS-3 Производитель: Scintrex (Канада); Тип: квантовый; Разрешение: 0,0006 нТл; Погрешность: 0,2 нТл; Диапазон измерений: 15–105 мкТл; Размеры блока электроники: 35x6,3см</p>
			<p>G-824A Производитель: Geometrics (США) Тип: квантовый (пассивный); Разрешение: 0,0003 нТл; Быстродействие: 1000 изм./с; Диапазон измерений: 20–100 мкТл; Размеры блока электроники: 6,35x38см; Общий вес: 2,3 кг.</p>

Рис. 6. Обзор некоторых известных магнитометров

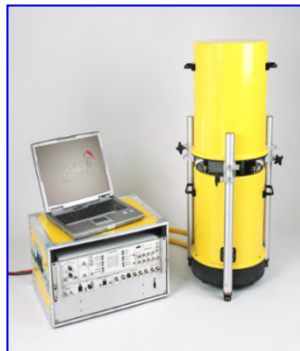
3. Наземные средства подготовки гравитационных карт

Лазерные абсолютные баллистические гравиметры

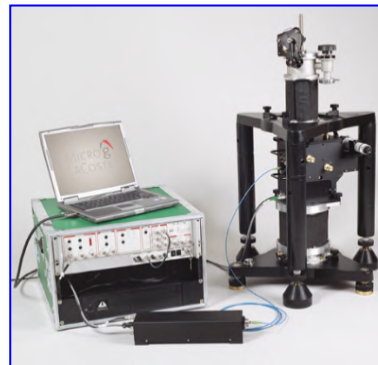
Лазерные абсолютные баллистические гравиметры (АБГ) предназначены для измерения абсолютного значения УСР по результатам измерения пути и времени свободного падения оптического уголкового отражателя. Некоторые известные зарубежные и отечественные абсолютные гравиметры представлены на рис. 7.



АБГ FG-5X MicroG-Lacoste
Погрешность: 2-3 мкГал



АБГ FG-L MicroG-Lacoste Погрешность: 10 мкГал



Государственный вторичный эталон, ВНИИФТРИ
Погрешность: 10 мкГал

а)



АБГ «ГРОТ» (ВНИИМ им Д.И. Менделеева)
Погрешность: 4 мкГал
Государственный первичный эталон – 2 мкГал

б)



Полевой АБГ ГАБЛ (СО РАН)
Погрешность: 20 мкГал

Рис. 7. Некоторые известные АБГ: а) зарубежные; б) отечественные

Время измерений в одной точке для существующих АБГ составляет 20-30 часов

Атомные абсолютные гравиметры и градиентометры

В последнее время во всем мире широко развивается направление по созданию абсолютных гравиметров и градиентометров, принцип действия которых основан на интерференции ультрахолодных атомов. Использование волновых свойств ультрахолодных атомов позволяет реализовать методы атомной интерферометрии, чувствительные к ускорению свободного падения. Характеристики создаваемых атомных гравиметров представлены на рис. 8, направления исследований – на рис. 9.

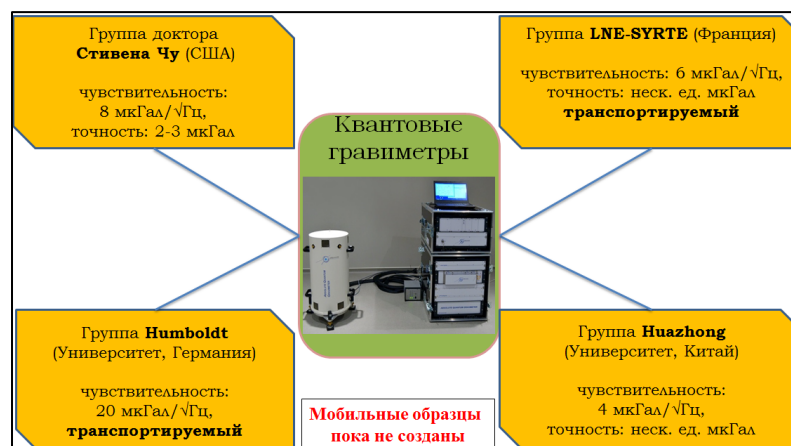


Рис. 8. Характеристики создаваемых атомных гравиметров

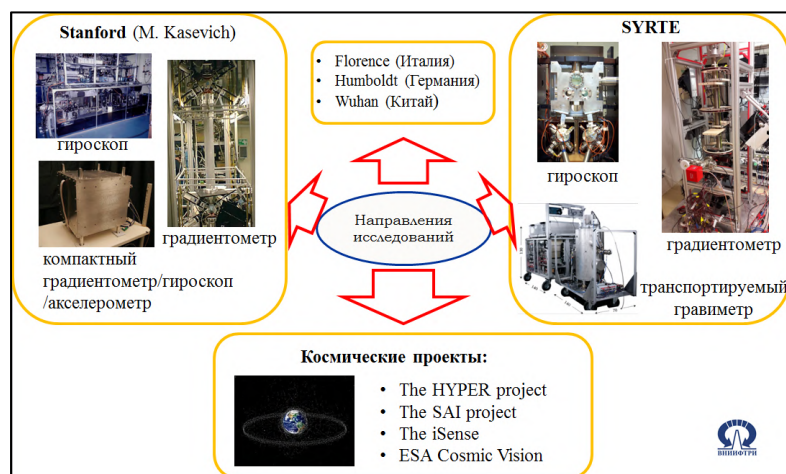


Рис. 9. Атомная интерферометрия и ее применение

Перебазироваемые и бортовые мобильные высокоточные относительные гравиметры

Высокоточные относительные гравиметры (ВОГ) предназначены для измерения приращения УСП относительно опорного значения. Особенностью ВОГ является высокая точность и высокая оперативность измерений (не более 30 мин. для одной точки). Некоторые известные зарубежные и отечественные ВОГ представлены на рис. 10.



ВОГ Burris Gravity Meter™
(США)
Погрешность: 5 мкГал

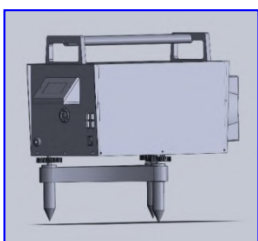


ВОГ Scintrex CG-5 (Канада)
Погрешность: 5 мкГал



Мобильный ВОГ GT-1; 2; 3
(Канада)
Погрешность: 0,5 мГал

а)



ВОГ ГНШ-МА
Погрешность: 20 мкГал



Мобильный комплекс морского гравиметра ГМН-КМ
Погрешность: менее 1 мГал



Мобильные гравиметрические комплексы ЧЕ-КАН-АМ, Попугай
Погрешность: менее 1 мГал

б)

Рис. 10. Некоторые известные ВОГ: а) зарубежные; б) отечественные

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» ведутся исследования по созданию ВОГ с чувствительным элементом с емкостным съемом (рис. 11). Чувствительность системы съема составляет единицы аттоФарад (10^{-18} Фарад).

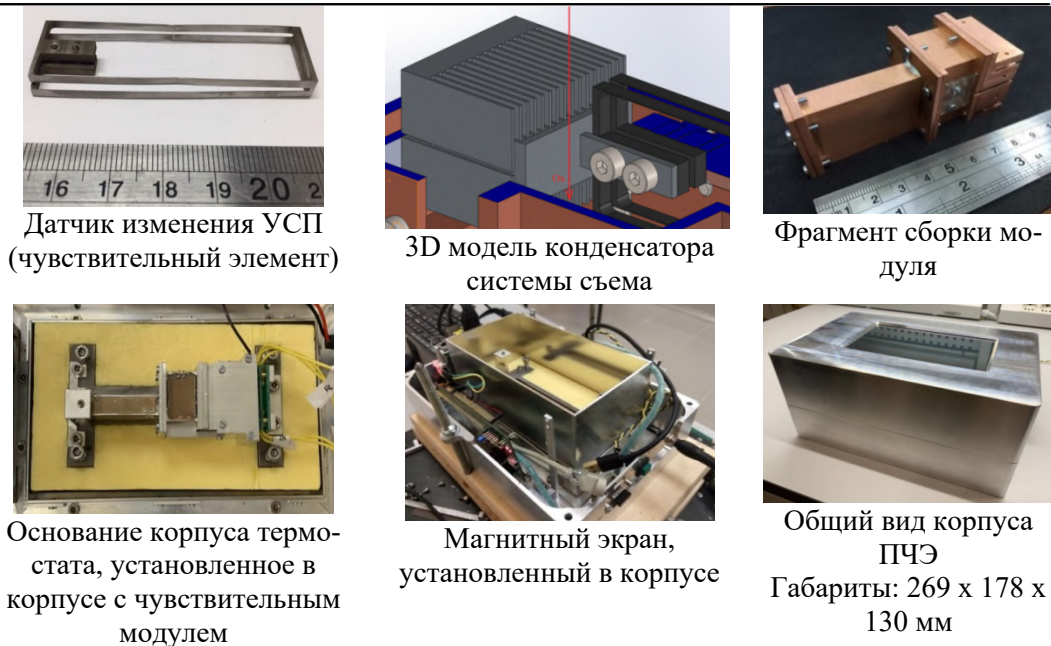


Рис. 11. ВОГ с чувствительным элементом с емкостной системой съема

В настоящее время проводятся лабораторные испытания этого ВОГ.

4. Создание единой высотной основы

Резолюция Международной ассоциации геодезии (IAG)

В 2015 г. на Пражской конференции IAG принята специальная резолюция «Об определении и реализации международной системы отсчета высот (IHRS)» [1]. Основная идея, изложенная в резолюции, состоит в использовании для отсчета высот поверхность геоида. Потенциал на поверхности геоида является постоянной величиной:

$$W_0 = 6,26368534 \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{с}^2.$$

Измеряемой величиной является геопотенциальное число ΔC_m , которое определяется следующим образом:

$$\Delta C_m = W_0 - W_m,$$

где W_m - гравитационный потенциал в исследуемой точке.

В проекте GGOS (Global Geodetic Observing System) точность, предъявляемая к определению геопотенциального числа, равна:

$$\delta C_m = 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}^2.$$

Это соответствует погрешности определения высот геоида δH на уровне 1 мм.

Релятивистская геодезия. Принцип квантового нивелира

Классическим методом определения высот (превышения) геоида является нивелирование с использованием геодезических средств измерений. В основе принципа квантового нивелира лежит гравитационный эффект замедления времени и гравитационный эффект смещения частоты. Для подвижных часов:

$$\frac{\Delta\tau_{GR}}{\tau} = \frac{\Delta f_{GR}}{f} = \frac{\Delta C_m}{c^2} - \frac{V_0^2 - V_m^2}{2c^2}, \quad (1)$$

где V_0, V_m - скорости движения используемых часов.

Для неподвижных наземных часов ($V_0 = V_m = 0$) формула (1) переписывается в виде:

$$\frac{\Delta\tau_{GR}}{\tau} = \frac{\Delta f_{GR}}{f} = \frac{\Delta C_m}{c^2} \approx \frac{g_m \cdot \Delta H_{ORT}}{c^2}, \quad (2)$$

где g_m - абсолютное значение УСП;

ΔH_{ORT} - разность ортометрических высот.

При $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$ погрешность измерения $\delta C_m \approx 0,01 \text{ м}^2/\text{с}^2$, $\delta H \approx 1 \text{ мм}$ достигаются при условии:

$$\frac{\delta\tau_{GR}}{\tau_1} = \frac{\delta f_{GR}}{f_1} = 10^{-19}. \quad (3)$$

Принцип квантового нивелира на перевозимых СЧВ представлен на рис. 12.

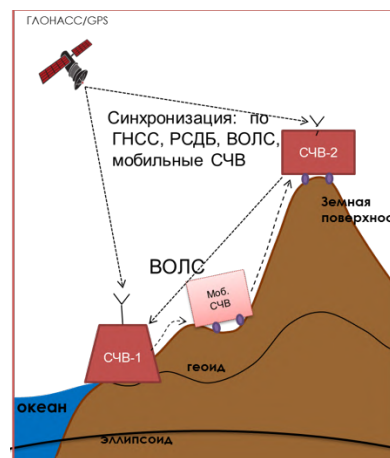


Рис. 12. Принцип квантового нивелира на перевозимых СЧВ

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» проведен эксперимент по измерению геопотенциального числа и разности ортометрических высот между пунктами Моск-

ва – Нижний Новгород с синхронизацией измерений по сигналам ГНСС с использованием метода релятивистской синхронизации (рис. 13).



Рис. 13. К описанию эксперимента

Первоначально мобильный СЧВ ПКЧ-Н синхронизировался с первичным эталоном ГЭТ 1-2018, далее ПКЧ-Н перемещались на оборудованной мобильной лаборатории в Нижний Новгород и в течение 62 ч располагались в точке с разностью высот - 65 м относительно ГЭТ 1-2018.

После этого ПКЧ-Н на мобильной лаборатории возвращались обратно и повторно синхронизировались с ГЭТ 1-2018.

Измеряемое расхождение шкал времени $\Delta\tau$ мобильного СЧВ (со шкалой τ_m) и стационарного СЧВ (со шкалой τ_0) на суточном интервале $\Delta\tau_0$ складывается из следующих составляющих:

$$\Delta\tau = \tau_m - \tau_0 = \Delta\tau_{GR} + \Delta\tau_{C_1} + \Delta\tau_{C_2} + \Delta\tau_T + \sigma(\tau), \quad (4)$$

где $\Delta\tau_{GR}$ – искомый эффект релятивистского смещения шкал времени; $\Delta\tau_{C_1} = C_1 \cdot \Delta\tau_0$ – собственный ход шкалы времени мобильного СЧВ за счет начальной относительной разности частот $C_1 = \Delta f / f_0$, по отношению к эталонной частоте f_0 ; $\Delta\tau_T = K_T \cdot \int_{\Delta\tau} \Delta T \cdot d\tau_0$ – температурное расхождение шкал, которое определяется температурным коэффициентом частоты K_T и разность температур ΔT в точках измерения; $\Delta\tau_{C_2} = C_2 \cdot \Delta\tau_0^2$ – смещение, вызванное относительной нестабильностью C_2 частоты мобильного СЧВ; $\sigma(\tau)$ – среднеквадратическая ошибка измерений.

Результаты эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 3

Сводная таблица по результатам эксперимента Москва – Нижний Новгород

Местоположение ПКЧ-Н		Менделеево ↓ Н.Новгород	Н. Нов- город	Н. Новгород ↓ Менделеево
Время движения/время стоянки, ч		8,7	62	7,2
Расхождение шкал, вызванное:				
1	Собственным ходом, нс $\Delta\tau_{C_1} = \Delta\tau_0 \cdot \Delta f / f_0$, $\Delta f / f_0 = 3,848 \cdot 10^{-13}$	11,826	84,280	9,787
2	Температурными изменениями частоты, нс	0,0027	0,008	-0,0021
3	Релятивистскими эффектами, нс	-1,651	–	0,822
4	Влиянием центробежного потенциала при размещении ПКЧ-Н в Н.Новгороде, нс	–	-1,251	–

Согласно (4) и с учетом табл. 3, гравитационное расхождение шкал времени, вызванное разностью ортометрических высот, составляет -1,399 нс, что соответствует разности ортометрических высот - $57,5 \pm 9,2$ м, при действительной разности высот - 65 м.

5. Новые технологии подготовки карт по измерениям УОЛ

Использование астроизмерителя для создания карт градиентов

С появлением цифровых астроизмерителей появилась возможность на новом уровне измерить значения составляющих уклонений отвесной линии ξ , η с погрешностью на уровне долей угловых секунд и дискретностью сотни метров. При этом если в этой же точке измерить значение УСП с использованием гравиметра, то можно вычислить компоненты УСП g_x , g_y [2]:

$$g_x \approx -g \cdot \xi, \quad g_y \approx -g \cdot \eta. \quad (5)$$

Согласно определению потенциала, проекции g_x и g_y силы тяжести равны производным ее потенциала W по соответствующим координатам [2]:

$$g_x = \frac{\partial W}{\partial x}, \quad g_y = \frac{\partial W}{\partial y}. \quad (6)$$

Но потенциал W равен сумме потенциалов нормального U и аномального T полей:

$$W = U + T. \quad (7)$$

Потенциал нормального поля вычисляется по известным формулам. Поэтому определение гравитационного поля состоит в определении потенциала сложного аномального поля по результатам измерений в следующей форме:

$$\begin{aligned} T_{xx} &= \frac{g_{x2} - g_{x1}}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta g_x}{\Delta x}, T_{xy} = \frac{\Delta g_y}{\Delta x}, T_{yy} = \frac{\Delta g_y}{\Delta y}, T_{yx} = \frac{\Delta g_x}{\Delta y}, \\ T_{xz} &= -\frac{(g-\gamma)_2 - (g-\gamma)_1}{\Delta x} = -\frac{\Delta g_2 - \Delta g_1}{\Delta x} = -\frac{\delta g}{\Delta x}, T_{yz} = -\frac{\delta g}{\Delta y}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\Delta x, \Delta y$ – расстояния между точками измерений по оси OX и OY соответственно;

γ – нормальное значение УСП, рассчитанное с учетом высоты пункта;

Δg – аномалия силы тяжести (АСТ) в свободном воздухе;

δg – изменение АСТ между точками.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» создан макет астроизмерителя с СКО измерений 0,2" [3]. С использованием макета астроизмерителя проведены измерения на полигоне, состоящем из 18 точек с расстоянием между точками 3-5 км [4] и на известной Московской аттракции. Для точек измерений рассчитаны значения УОЛ с использованием модели геопотенциала EGM2008. Карта разности измеренных и модельных значений УОЛ по долготе представлена на рис. 14а, результаты измерений на Московской аттракции – на рис. 14б. При этом обнаружены локальные аномалии, которые в моделях геопотенциала отсутствуют.

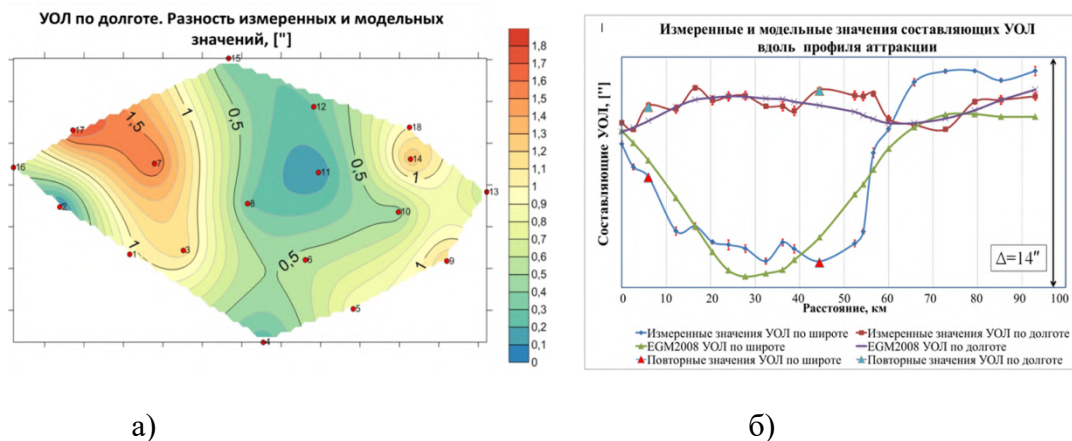


Рис. 14. Результаты измерений значений УОЛ с использованием астроизмерителя:
а) карта разности измеренных и модельных значений УОЛ по долготе на полигоне;
б) результаты измерений на Московской аттракции

На этих же точках измерения УСП выполнялись с использованием ВОГ Scintrex CG-5. С использованием измеренных значений составляющих УОЛ и УСП в дальнейшем планируется выполнить расчет компонент гравитационного градиента в соответствии с (8) с оценкой погрешности интерполяции.

В соответствии с (8) основной вклад в погрешность вычисления гравитационных градиентов вносит погрешность определения составляющих УОЛ. При погрешности измерений составляющих УОЛ 0,2" и расстоянии между точками измерений 1,5 км погрешность вычисления компонент гравитационного градиента находится на уровне 10 Этвеш.

Астрономический павильон для сличения астроизмерителей

Для организации наблюдений, испытаний, сличений и метрологического обеспечения астроизмерителей создан комплекс средств метрологического обеспечения астроизмерителей. Комплекс включает:

- 1) астрономический павильон, который выполнен в виде блок-контейнера;
 - 2) железобетонные постаменты, заглубленные на 2 м, для обеспечения устойчивости при наблюдениях;
 - 3) необходимые технические условия (электропитание, освещение и т.д.)
- (рис. 15).



а)



Постаменты

б)

Рис. 15. Астрономический павильон: а) внешний вид; б) вид изнутри – постаменты с установленным макетом астроизмерителя

6. Космические средства подготовки карт

Определение параметров ГПЗ на основе сигналов ГЛОНАСС в кластере космических аппаратов (КА)

Система ГЛОНАСС может использоваться как основа при разработке проекта космического гравиметрического комплекса в виде многоспутникового кластера. В состав кластера КА входят:

не менее двух низкоорбитальных космических аппаратов (НКА) с бортовой навигационной аппаратурой и комплектом антенн (в надири и зенит), а также микроакселерометром;

орбитальная группировка ГЛОНАСС с межспутниковой лазерной навигационной связной системой.

Навигационная аппаратура работает в трех режимах и позволяет:

1. Определить значение бортового ускорения КА в режиме «ГЛОНАСС-НКА» как вторую производную дальности:

$$g_{iKA} = \frac{\partial^2 R_i}{\partial t^2} \times \sin(\alpha),$$

где g_{iKA} – бортовое значение УСП;

R_i – измеренное расстояние между НКА и i -ым спутником в зоне видимости;

α – угол между направлением по линии «НКА-ГЛОНАСС» и местной вертикалью.

2. Определить значение градиента гравитационного поля в режиме «НКА-НКА» по относительным значениям координат и ускорений:

$$\begin{pmatrix} \Delta X'' \\ \Delta Y'' \\ \Delta Z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{xx} & U_{xy} & U_{xz} \\ U_{yx} & U_{yy} & U_{yz} \\ U_{zx} & U_{zy} & U_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix},$$

где $\Delta X''$, $\Delta Y''$, $\Delta Z''$ – относительное ускорение двух НКА по координатным осям;

ΔX , ΔY , ΔZ – разность координат двух НКА;

$U_{i,j}$ – составляющие гравитационного градиента.

3. Определить профиль высот геоида и состояния волнения в режиме «Бистатический радиовысотомер» по 20–30 отраженным сигналам ГЛОНАСС:

$$H_{\text{геод.}} = H_{\text{эл.}} - \frac{\rho_r - \rho_d}{2 \sin \theta},$$

где ρ_r – длина пути сигнала ГЛОНАСС, отраженной от поверхности;

ρ_d – длина пути прямого сигнала ГЛОНАСС;

θ – угол падения радиосигнала в точку зеркального отражения на поверхности;

$H^{эл.}$, $H^{геоид}$ – высота эллипсоида и геоида соответственно.

Межспутниковые измерения дальности в системе ГЛОНАСС изначально используются для высокоточного эфемероидного обеспечения. Однако они также могут использоваться для определения составляющих гравитационного градиента по направлению между спутниками:

$$\Delta \vec{r}'' = U_r'' \cdot \vec{r},$$

где $\Delta \vec{r}''$ – относительное ускорение двух КА ГЛОНАСС;

\vec{r} – измеренное расстояние между КА ГЛОНАСС;

U_r'' – составляющая гравитационного градиента.

Пример перспективного многоспутникового кластера представлен на рис. 16.

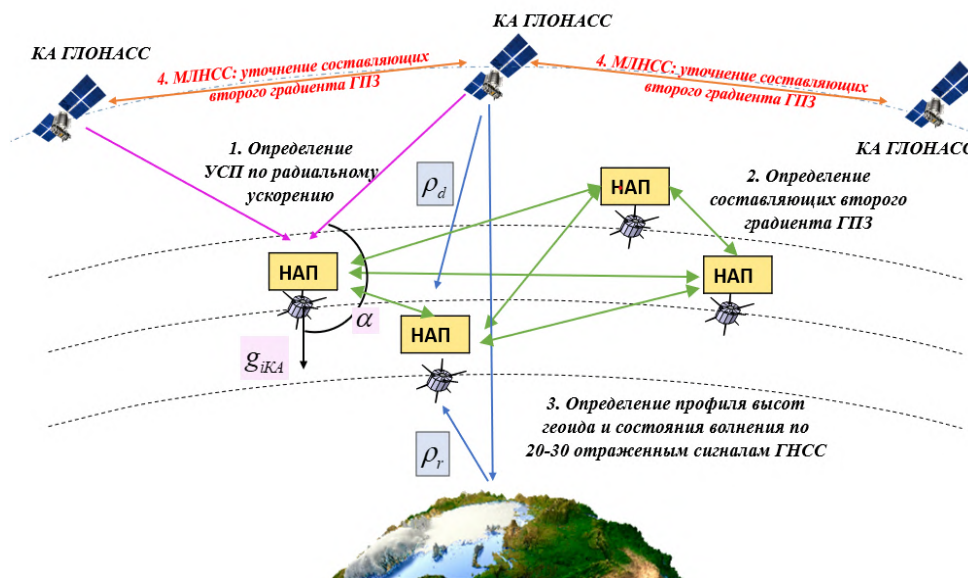


Рис. 16. Пример перспективного многоспутникового кластера

Наземный макет измерителя «спутник-спутник»

В настоящее время во ФГУП «ВНИИФТРИ» создается наземный стенд, включающий в себя макет лазерного интерферометра и пару макетов «спутников, свободных от сноса» с двумя степенями свободы с емкостным или лазерным съемом (рис. 17).

Лазерный интерферометр выполняет измерения в режиме измерения приращения расстояния между парой «спутников, свободных от сноса». При этом сначала реализуется простой режим приема и слежения за фазой отраженного сигнала, а затем режим переотражения с захватом и ретрансляцией фазы. В лабораторных условиях должна быть достигнута погрешность определения приращения расстояния по результатам измерения фазы лазерного луча не более единиц-десятков пм (10^{-12} м). В перспективе погрешность измерений на стенде должна быть снижена до уровня 10^{-14} - 10^{-15} м.

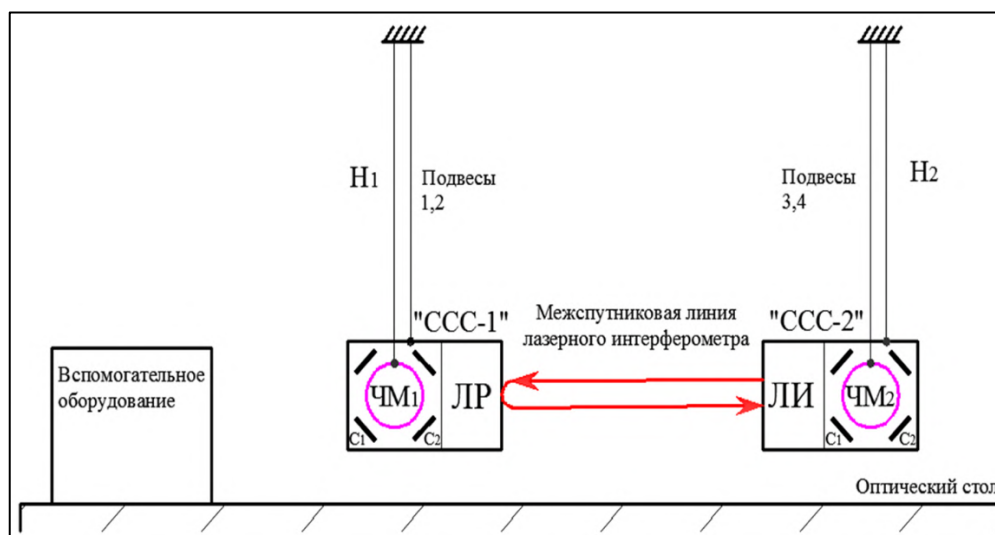


Рис. 17. Наземный макет измерителя «спутник-спутник» на основе макетов «спутников, свободных от сноса»

«ССС 1,2» – макеты «спутников, свободных от сноса»,
 ЛР – лазерный ретранслятор (отражатель);
 ЛИ – лазерный интерферометр;
 С1, С2 – конденсаторы емкостной системы определения перемещения чувствительных масс ЧМ1 и ЧМ2

Чувствительность макета гравигradientометра на свободных массах внутри КА

В космическом гравигradientометре на свободных массах (СМ) второй гравигradient потенциала силы тяжести на борту КА вычисляется по измерениям разности гравитационных сил, действующих на СМ, которые находятся на одной оси. Разность действующих гравитационных сил устанавливается по относительному движению СМ (рис. 18).

Главным преимуществом системы предлагаемого градиентометра является отсутствие бортового акселерометра, а также возможность непосредственного измерения приращения расстояния между двумя СМ на основе использования высокостабильных и точных измерителей длины, частоты и времени с известной метрологической базой [5].

Параметры космического макета на свободных массах:

- высота полета спутника – 250 км;
- дискретность отчетов – 1-10 с;
- погрешность бортового лазерного интерферометра – 0,01 нм;
- расстояние между свободными массами – 1 м.

При вышеуказанных характеристиках открывается возможность достичь чувствительности на уровне 0,0001-0,00001 Этвеш.

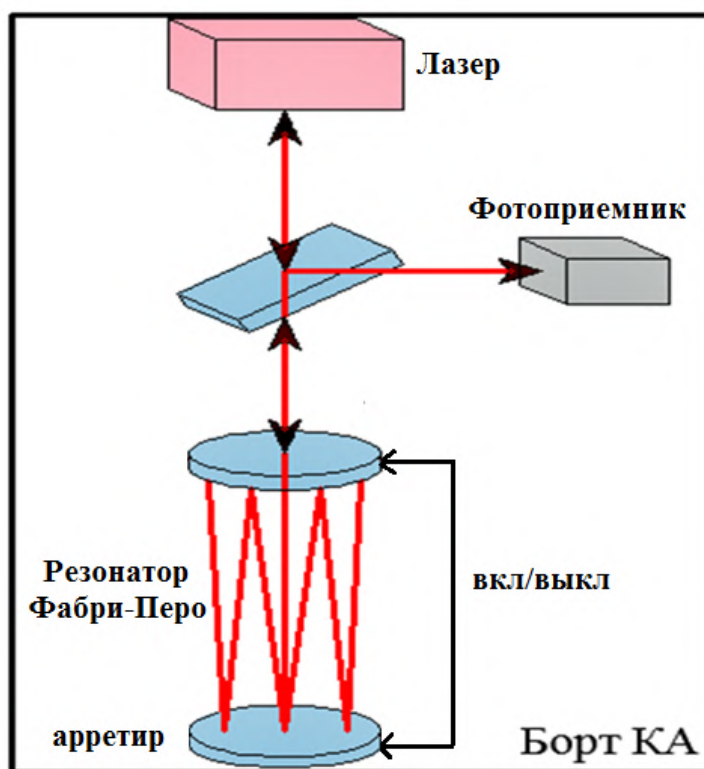


Рис. 18. Принцип действия лазерного градиентометра

Выполнена оценка влияния гармоник модели потенциала ГПЗ на величину изменения расстояния между массами. Результаты представлены в табл. 4.

Оценка влияния гармоник потенциала ГПЗ на изменение расстояния
между массами

Степень гармоник модели	Высота орбиты/Время накопления сигнала			
	400 км/20 с	400 км/10 с	200 км/20 с	200 км/10 с
	Величина влияния гармоник потенциала ГПЗ, нм			
10	6,429	1,439	9,471	2,055
100	0,441	0,017	3,171	0,359
150	0,129	0,002	1,082	0,218
200	0,006	0,000	0,030	0,017
250	0,001	0,000	0,015	0,011
300	0,000	0,000	0,003	0,000

Из результатов моделирования следует, что, как и ожидалось, уменьшение высоты орбиты КА и увеличение времени накопления сигнала приводят к увеличению эффекта влияния исследуемой гармоники ГПЗ на результаты измерений.

Метрологическое обеспечение космических градиентометров и систем «спутник-спутник»

Метрологическое обеспечение градиентометров

Этапы калибровки космического градиентометра и систем «спутник-спутник» можно разделить на 4 этапа:

1. *Лабораторные испытания.* Используются специальные наземные стенды для оценки элементов КГГ.

2. *Испытания в полете.* Используется бортовое оборудование на КА: звездные датчики, НАП, акселерометр, бортовые двигатели.

3. *Испытания по независимым наземным данным параметров гравитационного поля Земли.*

4. *Калибровка.* Используются эталонные полигонные данные.

Для выполнения калибровки с использованием данных наземной гравиметрии следует создавать комплекс полигонов, который характеризуется следующими параметрами:

- количество полигонов и место их размещения;
- размеры полигона;

- дискретность измерительной информации;
- состав и погрешность измерительной информации.

Полигоны следует располагать на участках с разными вариациями ГПЗ: равнинная, холмистая и горная местность. Следовательно, должно быть не менее трех полигонов.

Размеры полигона определяются параметрами космического градиентометра. В случае космического градиентометра по линии «спутник – спутник» размеры должны быть не меньше расстояния между спутниками (около 200 км). Для бортового градиентометра размеры полигона должны быть не меньше времени накопления измерений. В GOCE дискретность отчетов достигает 1 Гц, при этом КА пролетает расстояние порядка 8 км. Тогда, согласно теореме Котельникова, необходимо использовать участок размером 16 км для однозначного восстановления сигнала аномального ГПЗ. В итоге для удовлетворения требований двух систем длина полигона должна быть не менее 200-300 км.

Дискретность размещения измерительных пунктов зависит от аномальности ГПЗ в районе, т.е. в основном от рельефа местности. При выполнении работ следует придерживаться следующих требований к расстоянию между пунктами:

- горная местность – 1-3 км;
- холмистая местность – 3-7 км;
- равнинная местность – 7-10 км.

В зарубежных исследованиях для калибровки градиентометра используют результаты наблюдений гравиметров. Однако в последние десятилетие произошел скачок в области разработки средств определения параметров ГПЗ. Появились принципиально новые измерители. Например, измеритель разности гравитационных потенциалов на основе стандарта частоты и времени [6-8]. Также ведутся работы по усовершенствованию существующих измерителей. В Российской Федерации разработаны несколько образцов измерителя уклонений отвесной линии с погрешностью на уровне 0,2"-0,3" [9, 10]. Таким образом, возникают предпосылки к созданию полигонов, в которых определены следующие параметры ГПЗ:

1. Гравитационный потенциал.
2. Ускорение силы тяжести.
3. Вертикальный и горизонтальный градиенты.
4. Уклонение отвесной линии.

Использование измерителей различных параметров ГПЗ позволяет выполнить верификацию полученной измерительной информации и осуществить с меньшей погрешностью интерполяцию и редуцирование измерительной информации.

Создание комплекса наземных полигонов требует серийного производства соответствующих перспективных наземных гравиметрических измерителей:

- измерители разности гравитационных градиентов – выполнено несколько экспериментов на территории Российской Федерации;
- относительные и абсолютные гравиметры;
- градиентометры;
- измеритель уклонений отвесной линии – серийный выпуск.

Использование данных о рельефе местности для верификации данных УСП

В настоящее время создание перспективной космической геодезической системы заключается не только в создании спутниковых измерителей параметров ГПЗ (УСП и гравитационных градиентов), но и в разработке методов их калибровки на наземных полигонах. Предполагается, что наземные полигоны калибровки будут располагаться на доступной территории и обладать набором измерительных данных значений ускорения свободного падения и гравитационных градиентов. Однако такой метод калибровки является локальным и не позволит выполнить оценку качества измерительной информации над недоступными территориями. Одним из возможных методов оценки корректной работы спутникового измерителя параметров ГПЗ является использование цифровых карт рельефа. Для подтверждения возможности использования цифровых карт рельефа необходимо выполнить оценку корреляционных зависимостей между изменениями рельефа местности и параметрами ГПЗ. На примере участка известной территории (рис. 19) показаны графики взаимно-корреляционной функции нормированных значений высот рельефа и ускорения свободного падения составляющих $W_{\Delta_изм}$ и $W_{\Delta_выч}$. Результаты вычислений представлены на рисунке 20.

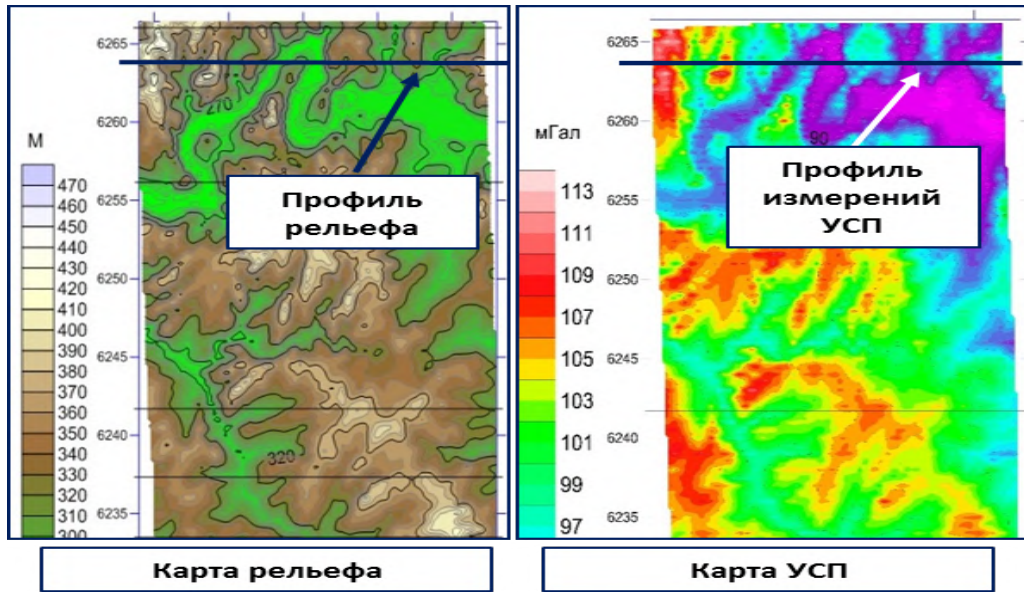


Рис. 19. Пример наземной съемки УСП

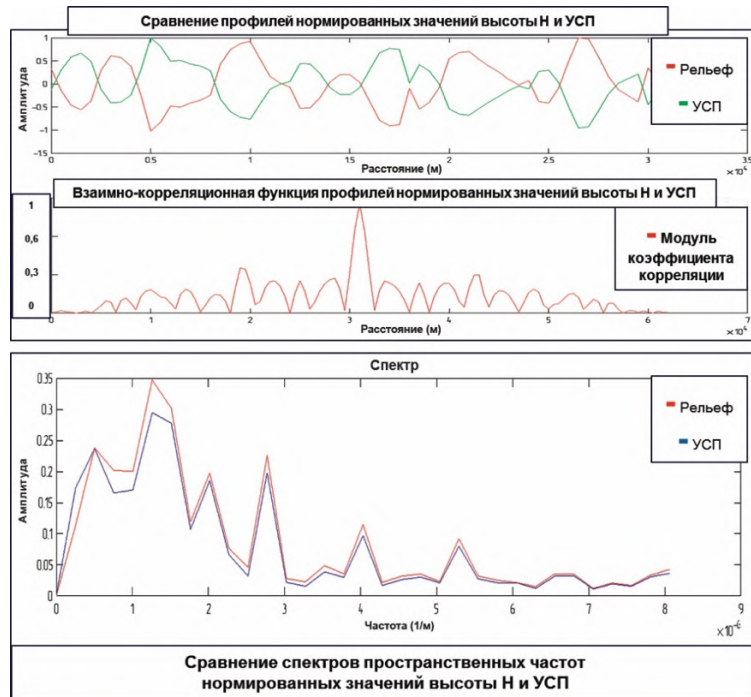


Рис. 20. Корреляционные и спектральные характеристики профиля высот рельефа и ускорения свободного падения

На графике взаимно-корреляционной функции чётко прослеживается зависимость УСП от высот рельефа. При этом спектральные составляющие пространственных частот УСП и высот рельефа практически полностью совпадают.

Использование данных о рельефе местности для верификации карт гравиградиентов

На примере территории с измеренными значениями гравитационных градиентов (рис. 21) показаны графики взаимно-корреляционной функции нормированных значений высот рельефа и составляющих $W_{\Delta_изм}$ и $W_{\Delta_выч}$. Результаты вычислений представлены на рис. 22.



Рис. 21. Схема расположения профиля измерений гравитационных градиентов

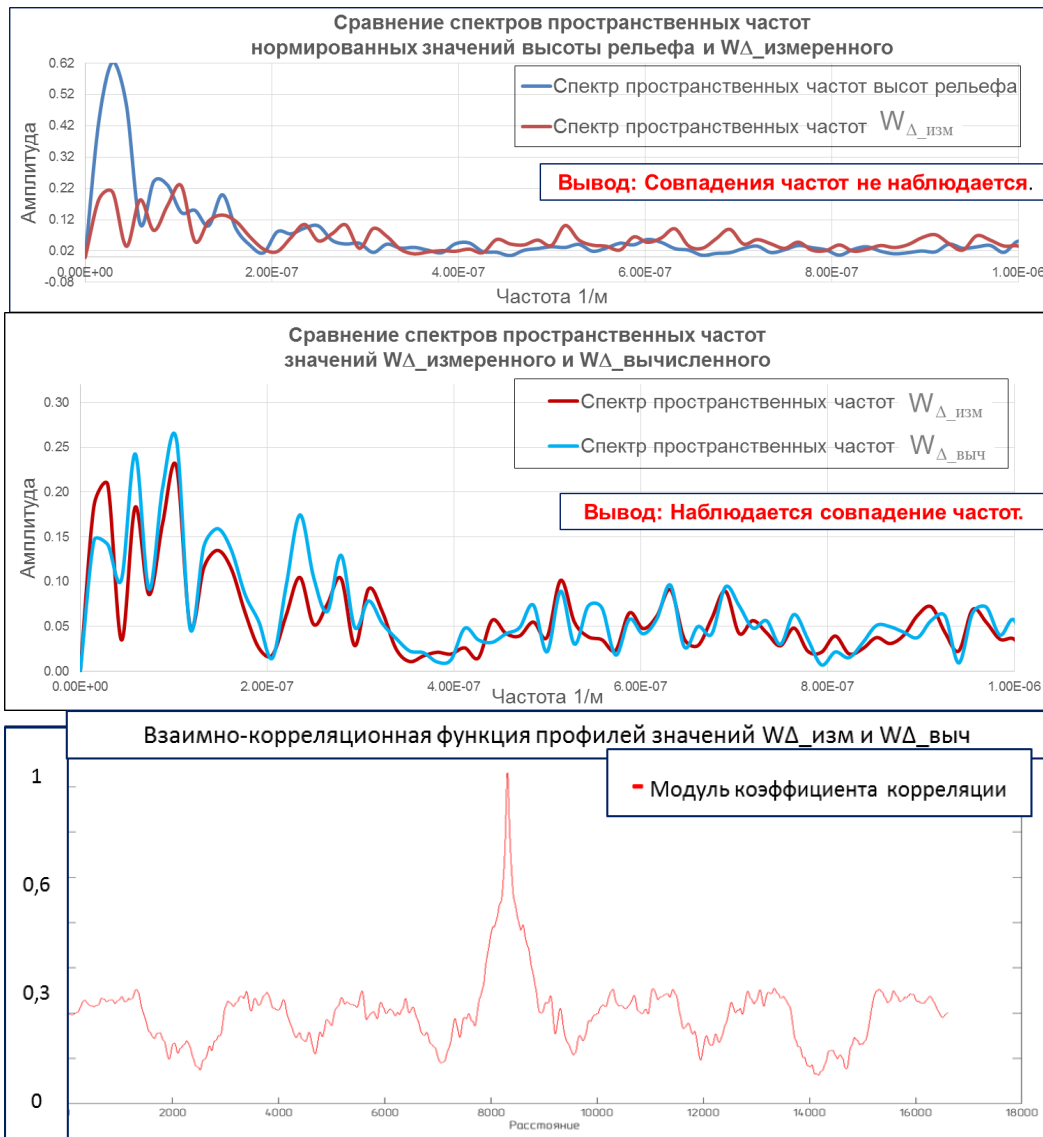


Рис. 22. Корреляционные и спектральные характеристики профиля высот рельефа и гравитационных градиентов

На графике спектральные составляющие пространственных частот W_{Δ} ИЗМ и высот рельефа не совпадают, однако при этом спектральные составляющие пространственных частот W_{Δ} ИЗМ и W_{Δ} ВЫЧ совпадают полностью. Наблюдается практически полная корреляция между измеренными значениями W_{Δ} ИЗМ и W_{Δ} ВЫЧ.

Вывод: рельеф местности можно использовать для верификации вычислений составляющих гравитационных градиентов W_{Δ} по измерениям «спутник-спутник».

7. Измеритель высоты геоида и высоты волн на основе сигналов ГНСС

Общие сведения

Определение профиля геоида представляет собой одну из основных задач геодезии, гравиметрии и океанографии. Поверхность геоида совпадает с поверхностью Мирового океана при отсутствии возмущающих сил, таких как ветер, океанические течения, приливы, и условно продолжается под материками. При описании геоида прибегают к понятию высоты геоида – возвышения геоида над эллипсоидом.

В настоящее время для измерения высоты геоида на акватории Мирового океана используют метод активной спутниковой альтиметрии. Эти методы основаны на использовании радиовысотомеров, размещенных на борту специальных космических аппаратов (КА) геодезического назначения. Активная спутниковая альтиметрия обладает высокой точностью измерений. Вместе с тем, можно выделить следующие недостатки активной спутниковой альтиметрии:

- бортовой радиовысотомер требует источника электропитания большой мощности;
- за один проход КА-носителя реализуется только один трек наблюдения текущего профиля высоты.

Для устранения данных недостатков возможно использование бистатической системы альтиметрии на основе отраженных сигналов от спутников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). При таком методе измерения высоты полностью исключается бортовое передающее устройство со всеми его недостатками. Кроме того, за один проход КА-носителя такой бистатической альтиметрической системы возможно получение до 20-30 треков профиля высоты геоида одновременно (по числу видимых навигационных спутников ГЛОНАСС/GPS/Galileo/BeiDou). Таким образом, повышается пространственный охват акватории за один сеанс измерений. Кроме того, преимуществом являются малые размеры и энергопотребление аппаратуры по отношению к активным радиовысотомерам при сохранении возможности работы в любое время суток и при любых погодных условиях.

Принцип действия бистатической альтиметрической системы

Принцип действия бистатической альтиметрической системы по сигналам ГНСС основывается на приеме прямых сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) антенной, направленной в «зенит». Отраженные от поверхности океана сигналы в окрестности точки зеркального отражения принимаются антенной, направленной в «надир» (рис. 23). Чтобы решить задачу определения высоты до отражающей поверхности, необходимо определить разность времени распространения прямого и отраженного сигналов, координаты и скорости приемника и НКА. Точность определения высоты зависит от шумов аппаратуры, точности учета ионосферной задержки, тропосферной задержки, алгоритмов обработки и др.

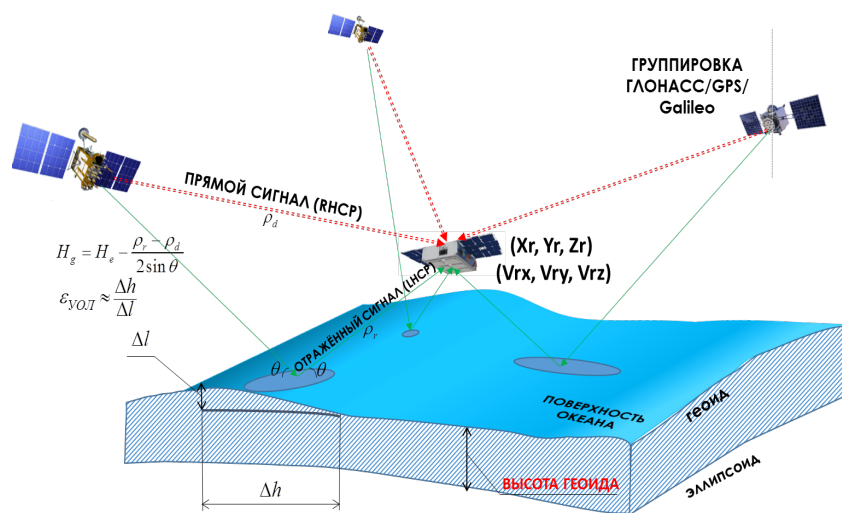


Рис. 23. Принцип работы бистатического радиовысотомера на основе отраженных сигналов ГНСС

Результаты экспериментов

Для отработки методов бистатической ГНСС-альтиметрии был проведен ряд экспериментальных измерений с моста над водохранилищем. В первом случае проверялся кодовый метод ГНСС-альтиметрии. Место проведения измерений показано на рис. 24. В точке 1 располагались приемные антенны. На рис. 25 представлены результаты измерений высоты до отражающей поверхности, СКО измерений составило 0,48 м. Из результатов измерений можно сделать вывод от том, что оптимальные углы возвышения спутников для данного метода являются 30° - 90°, а погрешность измерений может составлять до 1 м.

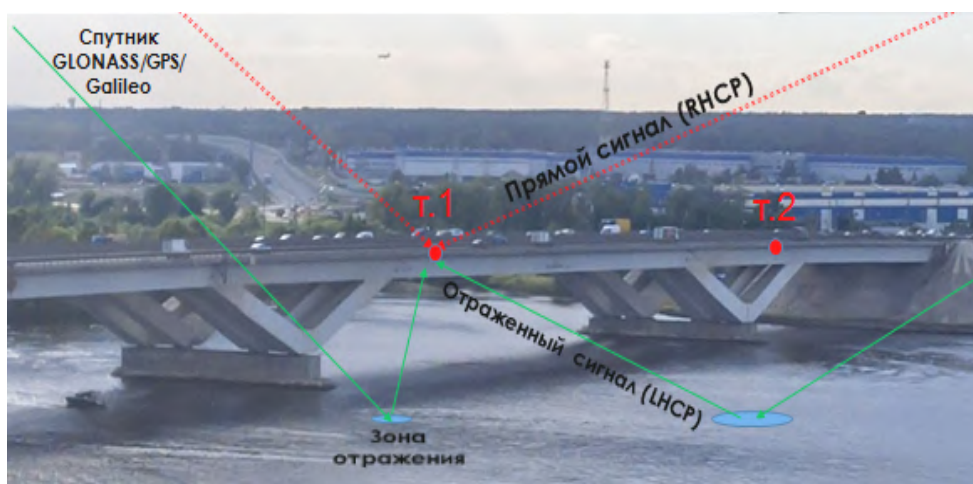


Рис. 24. Место проведения эксперимента: т.1 – место измерений при кодовом методе; т.2 – место проведения при методе С/Ш

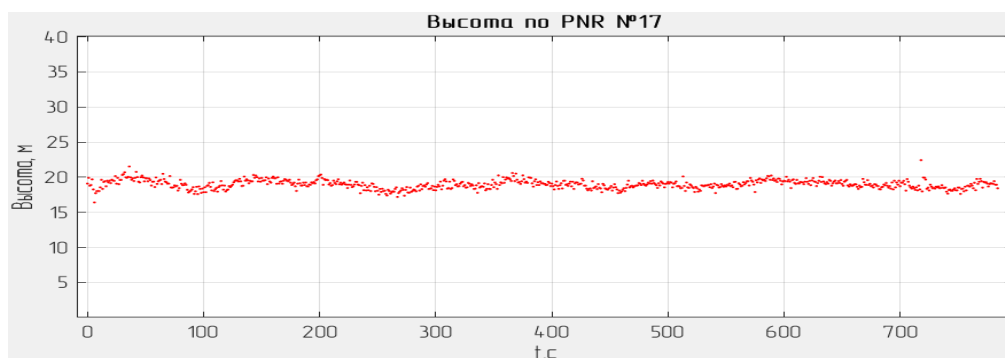


Рис. 25. Результаты измерения высоты с использованием кодового метода: измеренная высота - 19,2 м, истинная высота до отражающей поверхности 19,15 м

Метод С/Ш был проверен при измерениях в точке 2, реальная высота которой до отражающей поверхности составила 17,1 м, измеренная 17,1 м (рис. 26). Такая заметная разница между высотами т.1 и т.2 связаны с разницей высот моста и различными уровнями воды водохранилища в разные времена года, в которые проводились измерения.

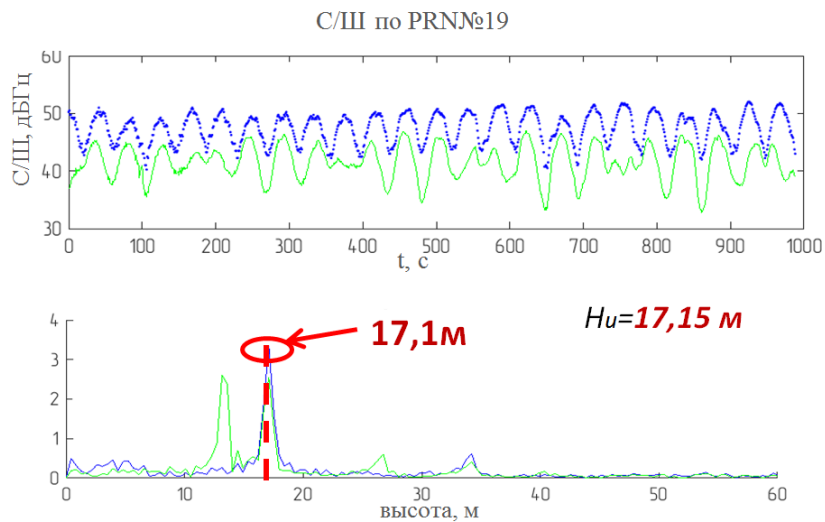


Рис. 26. Результаты измерений высоты с использованием метода С/Ш (синяя кривая L1, зеленая кривая – L2): сверху – колебания С/Ш; снизу оценка высоты

Для проверки фазового метода определения высоты над отражающей поверхностью была выбрана безэховая экранированная камера (БЭК) (рис. 27). Обеспечение условий необходимого волнения отражающей поверхности и необходимых углов возвышения НКА не всегда является выполнимой задачей при натурных измерениях.

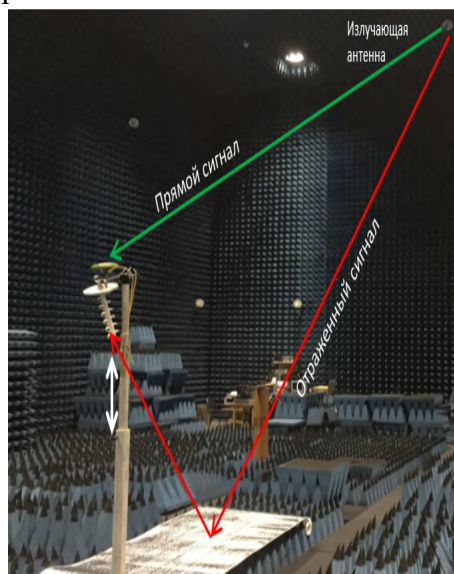


Рис. 27. Схема эксперимента в БЭК

На рис. 28 представлены результаты при опускании мачты с антенной и дальнейшем ее поднятии. Видно, что даже при быстром изменении высоты, начиная с 300-й секунды (40 см за 30 с), срывов фаз не происходило. СКО измерений составило не более 0,2 см.

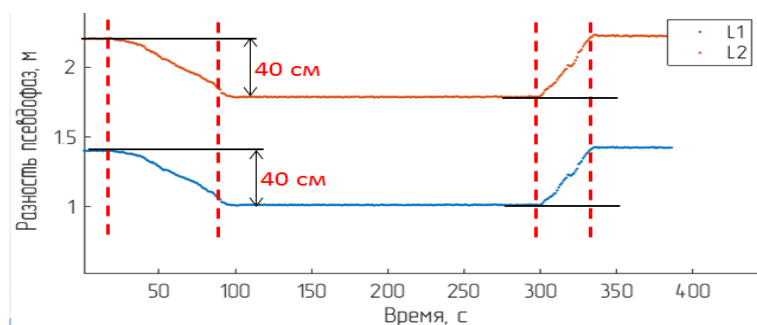


Рис. 28. Результаты эксперимента при изменении высоты мачты

8. Математический программный комплекс космической геодезической системы

Разработка математического программного комплекса космической геодезической системы позволит обеспечить проектирование системы и оценку ее эффективности на этапе эксплуатации.

Необходимый состав комплекса:

Математические программные модели бортовых космических измерителей:

- 1) классического космического радиовысотомера (ВРВ);
- 2) бистатического радиовысотомера на основе сигналов ГНСС;
- 3) межспутникового радиотехнического измерителя «спутник-спутник»;
- 4) космического бортового гравитационного градиентометра;
- 5) бортового микроакселерометра;
- 6) бортового лазерного градиентометра;
- 7) космического гравиметра на основе сигналов ГНСС;
- 8) космического градиентометра на основе сети НАП-НАП.

Модели наземных полигонных средств гравиметрии:

- 9) абсолютного баллистического гравиметра;
- 10) высокоточного относительного гравиметра;
- 11) горизонтального градиентометра на крутильных весах;
- 12) астроизмерителя уклонения отвесной линии;
- 13) наземного гравитационного полнотензорного градиентометра;

- 14) «квантового нивелира» и сети «квантовый футшток» на основе высокостабильных СЧВ;
- 15) орбитальной структуры КГС;
- 16) наземной системы испытательных полигонов КГС.

9. Лазерная гравитационно-волновая антенна на основе орбиты и технологий ГЛОНАСС

В известных проектах по созданию космических гравитационно-волновых антенн (ГВА) КА располагаются на сверхвысоких околоземных орбитах, геостационарных и солнечно-земных орбитах [11, 12]. Это позволяет регистрировать гравитационные волны (ГВ) с частотой до 1 Гц. В то же время наземные ГВА обеспечивают регистрацию ГВ с частотой более 10 Гц [13, 14]. Таким образом, возникает задача создания системы, обеспечивающей регистрацию ГВ с максимумом чувствительности в диапазоне 1-10 Гц.

Для регистрации ГВ с такими частотами предлагается использование КА на орбите ГЛОНАСС. При этом, возможно два варианта исполнения:

- вариант 1 (рисунок 29а):

- количество КА в орбитальной группировке ГВА – 3;
- угол между плечами интерферометра – 90° ;
- длина базы интерферометра – 36 тыс. км.

- вариант 2 (рисунок 29б):

- количество КА – 3;
- угол между плечами интерферометра – 60° ;
- длина базы интерферометра – 43,3 тыс. км;
- количество измерительных плеч – 3.

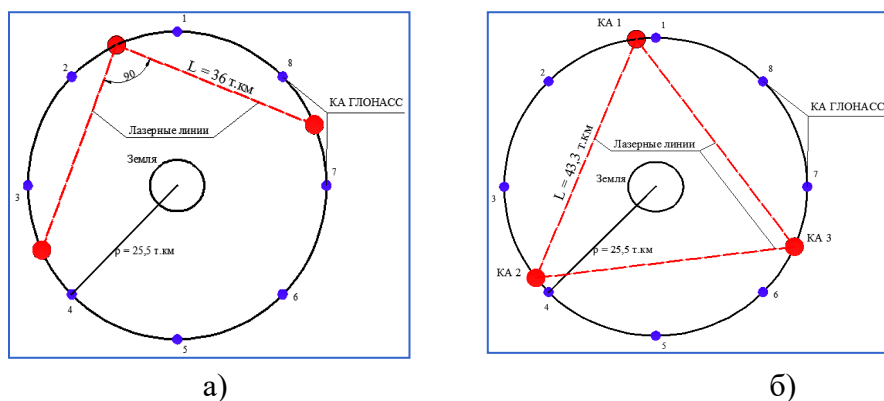


Рис. 29. Проект лазерной гравитационно-волновой антенны на основе орбиты и технологий ГЛОНАСС

Заключение

Таким образом, проблема обеспечения бесшовной навигации требует скорейшего решения следующих проблем:

1. Поскольку требования к точности бортовых гравитационных измерителей, реализующих режим «бесшовной» навигации, на 1-2 порядка превышают возможности современных бортовых гравиметров и градиентометров, то необходимо создание малогабаритных и высокоточных датчиков ГПЗ, реализованных на новых оптических и атомных измерительных технологиях и способных работать в условиях бортовой вибрации.

2. Абсолютные баллистические гравиметры, реализованные на лазерных и атомных технологиях, способны обеспечить требуемую точность подготовки навигационно-гравиметрических карт. Вместе с тем, необходимо создание мобильных вариантов этих приборов, обладающих необходимой точностью, габаритами и весами, пока не созданы.

3. Для реализации высокоточного квантового нивелира, использующего технологии релятивистской геодезии, и на его основе - российской сети «Квантовый футшток» необходимы СЧВ с нестабильностью $10E-(17-19)$. Особое внимание при этом необходимо уделить созданию мобильных СЧВ.

4. Перспективы повышения точности космических средств подготовки гравиметрических карт напрямую связаны с всесторонним использованием метрологических возможностей радиосигналов ГЛОНАСС и достижениями в области проектирования лазерных космических радио- и оптических интерферометров. При этом необходимо создание специальных наземных и бортовых комплексов для отработки новых измерительных технологий.

5. Создание бортовых космических средств гравиметрии требует развития стендовой базы лазерной интерферометрии, средств ее метрологического обеспечения, а также разработки математической модели системы. Необходимый задел во ФГУП «ВНИИФТРИ» имеется.

6. Для установления характеристик созданного во ФГУП «ВНИИФТРИ» астроизмерителя УОЛ целесообразно провести сличения этого прибора (российские или международные) с другими известными разработками. Условия для проведения сличений во ФГУП «ВНИИФТРИ» имеются.

Более подробные описания некоторых проблем, затронутых в данной статье, приведены в последующих статьях выпуска.

Литература

1. Ihde Johannes, Sa´nchez Laura, Barzaghi Riccardo, Drewes Hermann, Foerste Christoph, Gruber Thomas, Liebsch Gunter, Marti Urs, Pail Roland, Sideris Michael. Definition and Proposed Realization of the International Height Reference System (IHRs). *Surveys in Geophysics* 38(1):1-22. DOI 10.1007/s10712-017-9409-3.

2. Огородова Л. В. Нормальное поле и определение аномального потенциала. — М: Изд-во МИИГАиК, 2010. — 106 с.
3. Мурзабеков М.М., Фатеев В.Ф., Пругло А.В., Равдин С.С. Результаты астроизмерений уклонений отвеса с использованием нового метода измерений// Альманах современной метрологии. 2020. № 2(22). С. 42-56.
4. Мурзабеков М.М., Фатеев В.Ф., Равдин С.С., Пругло А.В. Комплекс для оперативного уточнения параметров неоднородности гравитационного поля Земли. В книге: Метрология времени и пространства.-Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». 2018. С. 202-205.
5. Фатеев В.Ф., Давлатов Р.А. Анализ возможностей космического градиентометра на свободных массах// Альманах современной метрологии. 2020. № 2(22). С. 65-72.
6. Fateev V.F., Zharikov A.I., Sysoev V.P., Rybakov E.A., Smirnov F.R. Measurement of the Difference in the Earth's Gravitational Potentials with the Help of a Transportable Quantum Clock / Doklady Earth Sciences. 2017. V. 472. Part 1. P. 91–94. doi:10.1134/S1028334X17010147.
7. Ribakov E.A., Fateev V.F. Zharikov, A.I., Sysoev V.P., Smirnov F.R. Experimental Determination of Orthometric Heights Difference Based on Gravitational Effects of Time Dilation, 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Saint Petersburg, Static and Mobile Measurements, 12-15 April 2016, Russia, ISBN 978-5-91995-033-2.
8. Fateev V.F., Sysoev V.P., Rybakov E.A. Meas Tech. 2016. 59: 402. doi:10.1007/s11018-016-0979-0.
9. Murzabekov M.M. Astrometer of deviations of a plumb line of development of FSUE "VNIIFTRI". V Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Graduate Students and Specialists "Metrology in the XXI Century". March 23. 2017. FSUE VNIIFTRI. P. 152-156.
10. Automated zenith telescope for obtaining the Earth's gravitational field parameters. Gaivoronskii S., Kuzmina N., Tsodokova V., Starosel'tsev L. Proceedings of the 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2016) Editor-in-Chief Academician of the Russian Academy of Sciences Vladimir G. Peshekhonov. 2016. P. 250-258.
11. Max-Planck-Institut für Quantenoptik, 1998, LISA (laser interferometer space antenna): an international project in the field of fundamental physics in space Pre-Phase A Report MPQ, 233 (Garching bei München, Germany).
12. Seto N., Kawamura S., Nakamura T. Possibility of direct measurement of the acceleration of the universe using laser interferometer gravitational wave antenna in space // Phys. Rev. Lett. 87. 221103. 2001.

13. Abramovici A., Althouse W. E., Drever R. W. P. et al. LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory // *Science*. 1992. V. 256, № 5055. P. 325–333.
14. Flaminio R. et al. The gravitational wave detector VIRGO // http://icfa-nano-beam.web.cern.ch/icfa-nano-beam/paper/Flaminio_Virgo.pdf.