

УДК 528 223

МАКЕТ СИСТЕМЫ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ПОЛЯМ ЗЕМЛИ

**В.Ф. Фатеев, Д.С. Бобров, Ю.В. Гостев, Е.А. Рыбаков,
М.Н. Карапетян, Р.А. Давлатов, А.О. Долгодуш, Ю.В. Москвитин**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская область
fateev@vniiftri.ru, bobrov@vniiftri.ru, ghosteff@vniiftri.ru, rybakov@vniiftri.ru, davlatov@vniiftri.ru, dolgodush@vniiftri.ru, moskvitin@vniiftri.ru*

В статье рассматривается подход к построению макета аппаратуры наземной системы навигации по геофизическим полям. В работе представлена структура такой системы и выполнены первые измерения по формированию гравитационных магнитных карт для обеспечения навигации макета. В заключение с помощью программно-математической модели макета аппаратуры наземной системы навигации по геофизическим полям с использованием подготовленных карт оценена точность навигации на маршруте движения.

Ключевые слова: навигация по геофизическим полям, гравитационное поле Земли, магнитное поле Земли.

LAYOUT OF THE SYSTEM ON GEOPHYSICAL POTENTIAL OF THE EARTH

**V.F. Fateev, D.S. Bobrov, Yu.V. Gostev, E.A. Rybakov,
M.N. Karapetyan, R.A. Davlatov, A.O. Dolgodush, Yu.V. Moskvitin**

*FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region
fateev@vniiftri.ru, bobrov@vniiftri.ru, ghosteff@vniiftri.ru, rybakov@vniiftri.ru, davlatov@vniiftri.ru, dolgodush@vniiftri.ru, moskvitin@vniiftri.ru*

The article discusses the approach to building a prototype of the equipment of the ground-based navigation system for geophysical fields. The structure of such a system is presented. The first measurements were performed in order to form gravitational and magnetic maps to ensure navigation. In conclusion, the accuracy of navigation along the route is estimated using the software-mathematical model of the prototype equipment of the ground-based navigation system for geophysical fields.

Keywords: geophysical field navigation, Earth's gravitational field, Earth's magnetic field,

Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы типа ГЛОНАСС / GPS / GALILEO / BEIDOU имеют ряд неоспоримых преимуществ, таких как непрерывность навигации, глобальное покрытие и высокие точности определения местоположения. Однако существует ряд ситуаций, в которых уровень сигналов ГНСС либо существенно снижается (каньоны, туннели, закрытые помещения, локальное подавление сигналов), либо сигналы пропадают полностью (под землей, под водой, на других планетах), а также

в условиях помех [1].

Поэтому для потребителей, требующих непрерывного определения местоположения в любых условиях обстановки, целесообразно использовать комплексную навигационную систему, включающую как навигационную аппаратуру потребителя ГНСС (НАП ГНСС), так и аппаратуру навигации по геофизическим полям.

Основой комплексной системы навигации подвижных объектов является бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС). В качестве системы для ее коррекции обычно используется НАП ГНСС, которая позволяет получить высокую точность навигации в обычных условиях применения. В особых условиях применения комплексной системы навигации (снижение уровня и пропадание сигнала ГНСС) в качестве корректирующей системы предлагается применять корреляционно-экстремальные системы навигации (КЭНС), использующие измерения приращения параметров геофизических полей Земли: гравитационного и магнитного (ГПЗ и МПЗ) [2-5].

Макет системы навигации по ГФП

Для отработки технических решений во ФГУП «ВНИИФТРИ» был создан макет аппаратуры потребителя системы навигации с использованием измерений ГПЗ и МПЗ на основе мобильной лаборатории (рис. 1).

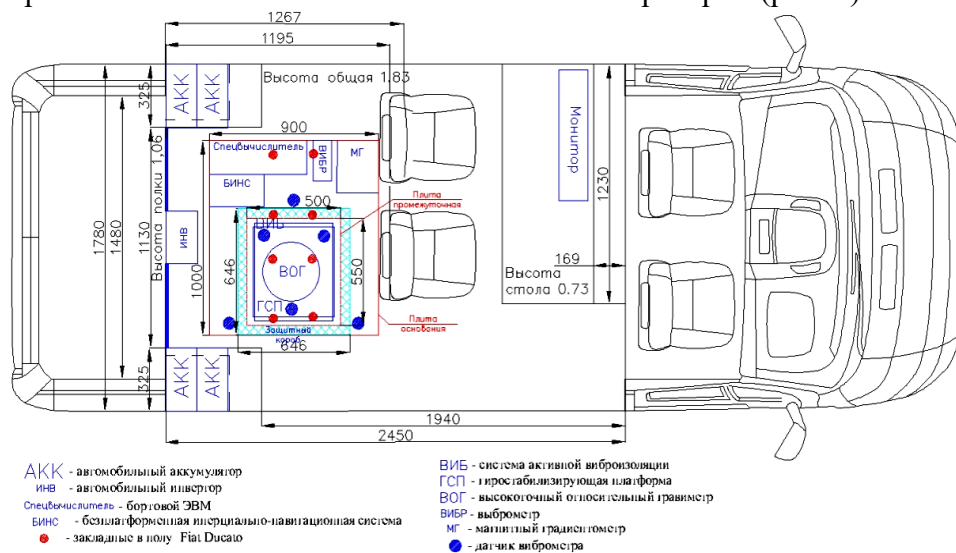


Рис. 1. Расположение оборудования в мобильной лаборатории

Макет комплекса автономной навигации предназначен для определения местоположения на маршруте навигации в условиях отсутствия сигналов ГНСС. Обязательным условием функционирования макета является наличие подготовленной навигационной карты параметров магнитного и гравитационного полей Земли.

Состав макета и назначение элементов:

- макет высокоточного относительного гравиметра для определения значений приращения ускорения свободного падения по маршруту навигации (рис. 2);
- магнитометр для определения составляющих напряженности магнитного поля;
- бесплатформенная инерциальная навигационная система для определения приращения координат объекта навигации относительно начальной точки путем интегрирования ускорений и угловых скоростей;
- комплект рабочей станции для сбора и обработки измерительной информации;
- система автономного питания: аккумулятор, инвертор и зарядное устройство.

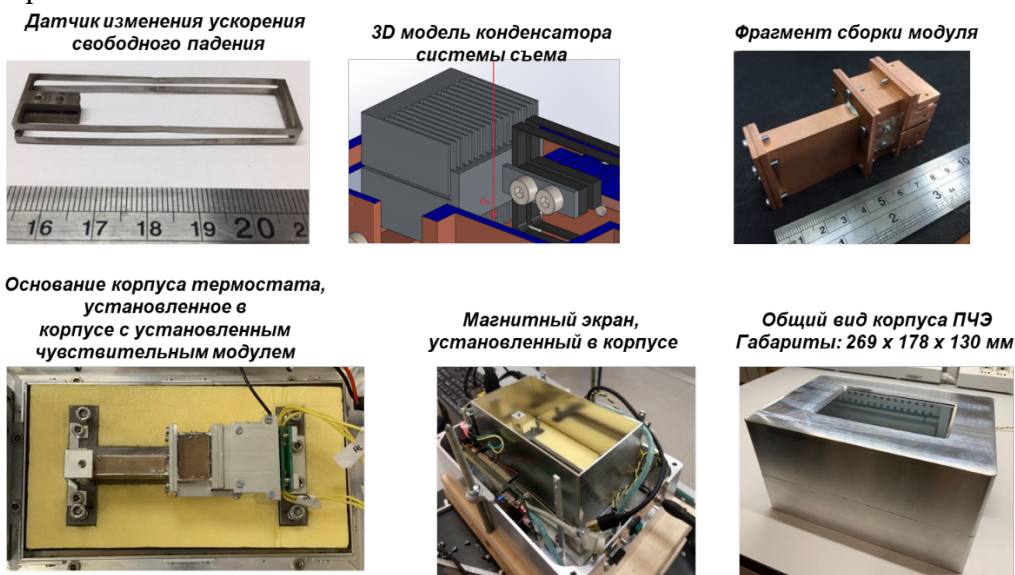


Рис. 2. Прототип макета измерителя приращения ускорения свободного падения разработки ФГУП «ВНИИФТРИ»

Макет измерителя приращения ускорения свободного падения разработки ФГУП «ВНИИФТРИ» предназначен для измерения УСП во время движения на подвижном основании. Для подготовки карт УСП использовался гравиметр Sintrex CG-5. Данный тип гравиметров предназначен для измерения исключительно в стационарных состояниях на подготовленном основании. В процессе подготовки карт для увеличения оперативности измерений Sintrex CG-5 был установлен на систему пассивной и активной виброизоляции внутри мобильной лаборатории. Данная мера позволила не только выполнять измерения в автомобиле, но и не выключать двигатель транспорт-

ного средства в процессе измерений (рис. 3). При таком подходе СКО измерений составляет менее 0,1 мГал.

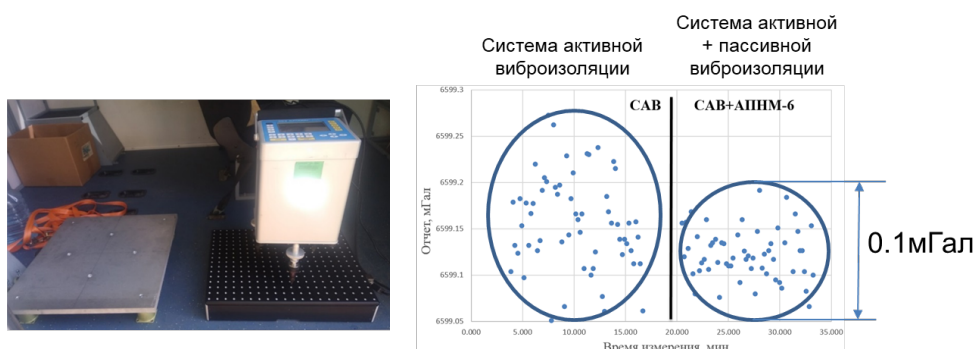


Рис. 3. Установка гравиметра на систему активной и пассивной системы виброизоляции

В качестве магнитометрической системы в макете системы навигации по геофизическим полям используются феррозондовые магнитометры от производителя «Sensys Magnetometers & Survey Solutions» с погрешностью не более 0,15 нТл (рис. 4).



Рис. 4. Магнитометрическая система макета аппаратуры потребителя

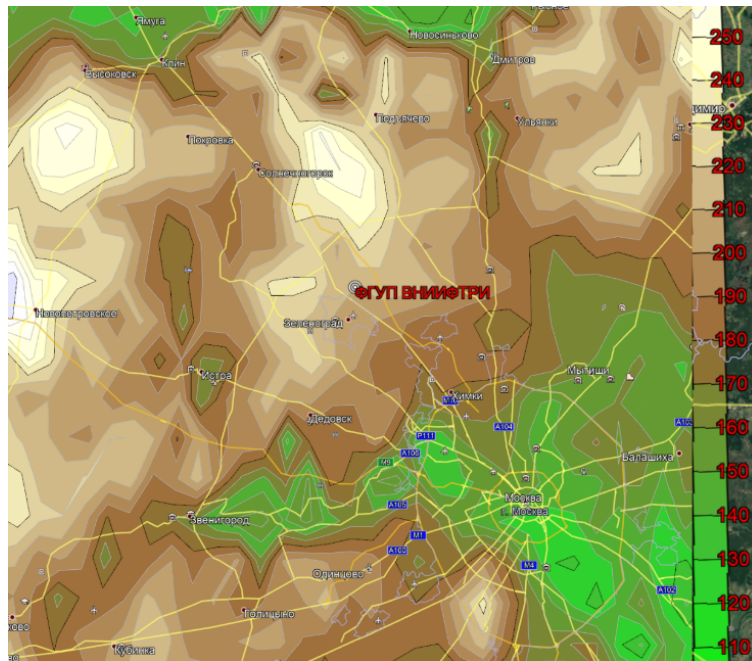
Выбор маршрута навигации и подготовка навигационных карт

При выборе маршрута навигации исходили из следующих предпосылок:

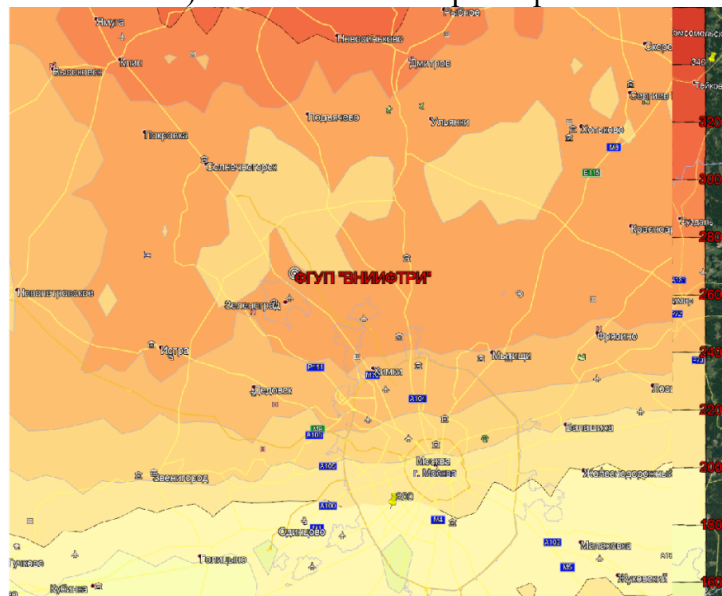
- маршрут должен располагаться вблизи ФГУП «ВНИИФТРИ» для сокращения времени доставки оборудования к маршруту;
- маршрут должен проходить через местность с наиболее выраженным изменением ускорения силы тяжести.

Степень изменения силы тяжести зависит от рельефа местности и гравитационных аномалий. Для оценки изменения высот рельефа вблизи ФГУП «ВНИИФТРИ» был выполнен расчет высот по маршруту с использованием цифровой матрицы высот SRTM 1 Arc-Second Global

(рис. 5). Для оценки величины аномалий силы тяжести использовалась модель гравитационного поля EGM2008 до степени и порядка 2190.



а) Изменение высот рельефа

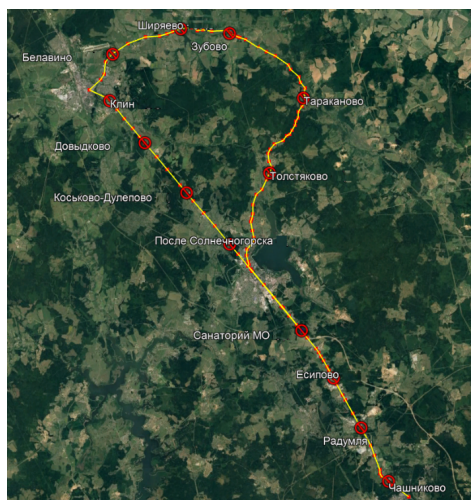


б) Изменение аномалий силы тяжести

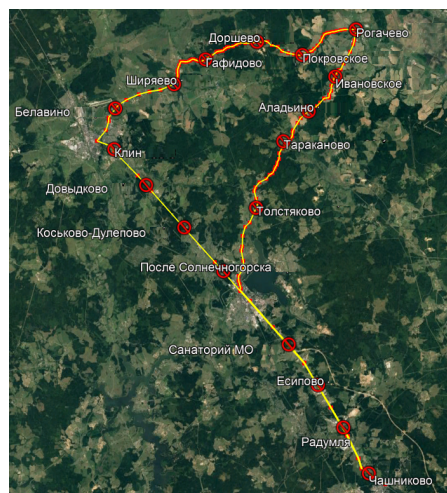
Рис. 5. Карта высот рельефа и аномалий силы тяжести

Анализ полученных данных свидетельствовал, что наиболее подходящей областью для выбора маршрута навигации является направление «Менделеево-Клин». Были намечены два возможных маршрута:

- маршрут 1: «Чашниково - Солнечногорск – Клин – Тараканово – Чашниково» (рис. 6а);
- маршрут 2: «Чашниково - Солнечногорск – Клин – Рогачево – Чашниково» (рис. 6б).



а) Маршрут 1



б) Маршрут 2

Рис. 6. Предполагаемые маршруты навигации

Для предварительной оценки величины изменения значения УСП вдоль двух предполагаемых маршрутов навигации были выполнены гравигеодетические измерения с использованием гравиметра Sintrex CG-5 и навигационной аппаратуры потребителя ГНСС ГЛОНАСС. Результаты измерений представлены на рис. 7.

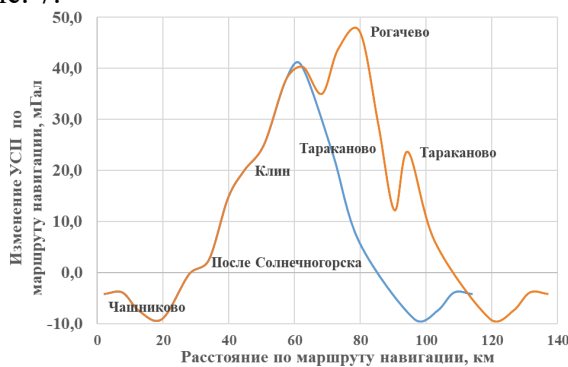


Рис. 7. Изменение ускорения силы тяжести вдоль двух предполагаемых маршрутов навигации

На маршруте № 2 были выявлены ярко выраженные изменения УСП на участке «Клин – Рогачево – Тараканово». В то же время участок «Чашниково – Солнечногорск» является достаточно пологим. Кроме того, замкнутый маршрут навигации является предпочтительным. Впоследствии выполняется корректировка БИНС без дополнительных измерений. Все это стало предпосылками к созданию укороченного замкнутого маршрута навигации: «Солнечногорск – Клин – Рогачево – Тараканово – Солнечногорск» (рис. 8).

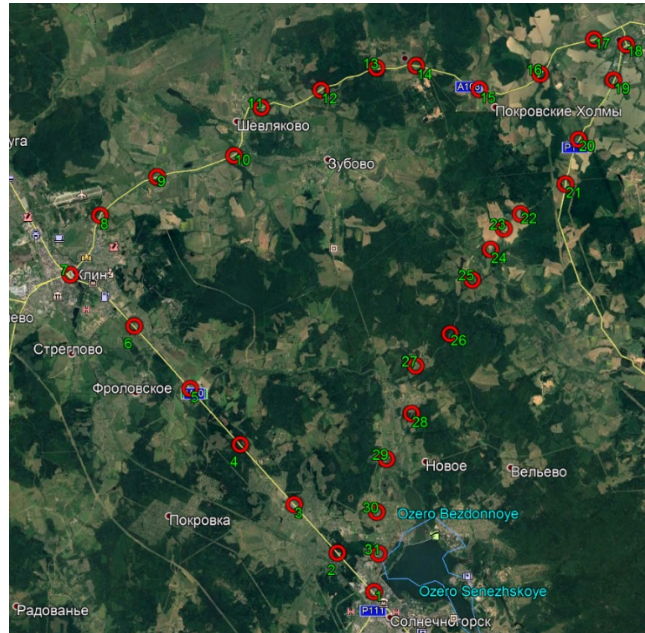


Рис. 8. Расположение опорных гравиметрических точек на маршруте навигации

Для составления навигационной гравиметрической карты по выбранному маршруту были выполнены гравигеодезические измерения с учетом следующих рекомендаций:

1. Расстояние между пунктами не более 3 км для уменьшения ошибки интерполирования.
2. Измерения выполняются в непосредственной близости от полотна дороги по направлению маршрута навигации. При значительном удалении необходимо выполнять измерения вертикального и горизонтального градиентов, что значительно увеличивает продолжительность работ.
3. Время накопления измерений в гравиметре не более 20 сек для упрощения фильтрации измерений от возмущающих вибраций вследствие движения транспорта.

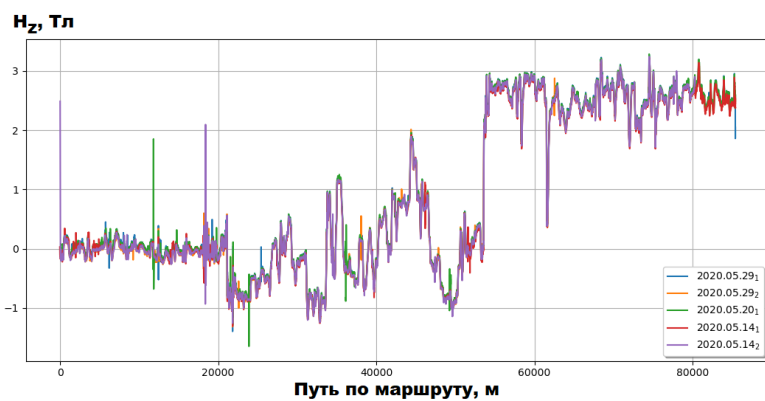
4. Время выполнения измерений гравиметром и навигационной аппаратурой не менее 15 мин для накопления статистической измерительной информации.



а)



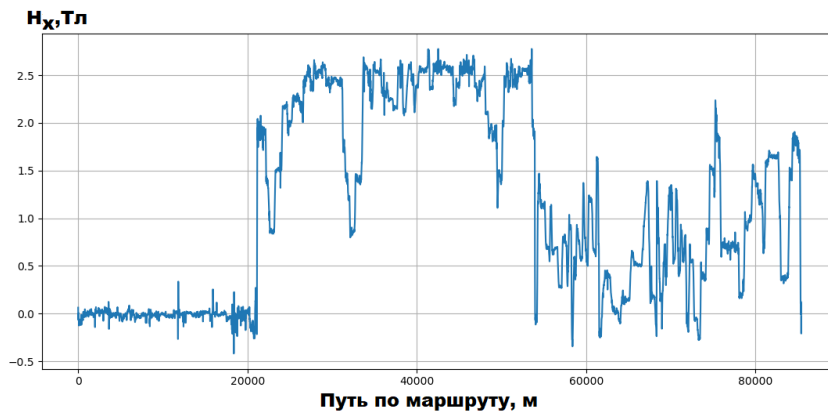
б)



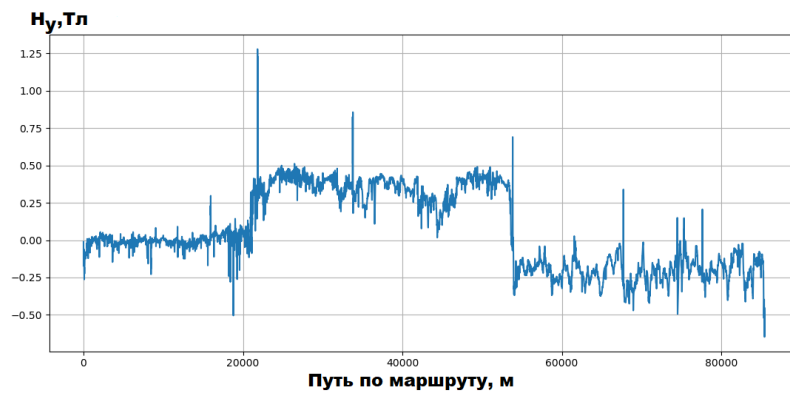
в)

Рис. 9. Измерения вектора магнитной индукции по составляющим вдоль маршрута движения для каждого проезда

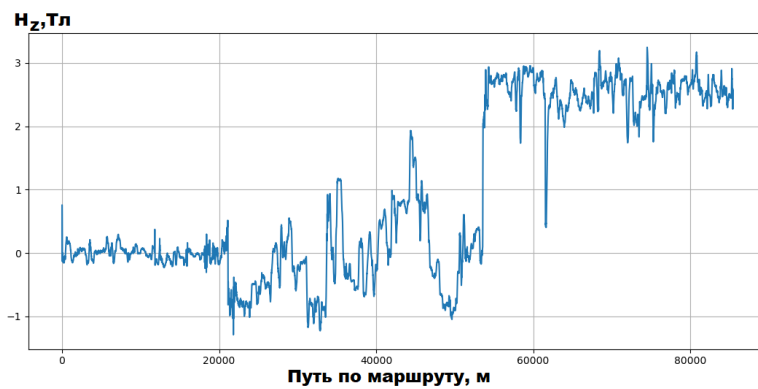
В итоге были выполнены измерения в 31 точке (рис. 8) с точностью определения значения УСП на уровне 10 мкГал и геодезических координат на уровне 0,2 м.



а)



б)



в)

Рис. 10. Измерения вектора магнитной индукции по составляющим вдоль маршрута движения

Помимо гравитационных измерений были выполнены измерения составляющих вектора магнитной индукции и проводилась оценка его вариации во времени. Для этого проводились измерения по маршруту в различные дни (рис. 9). После совместной обработки получена карта значений напряженности магнитного поля для каждой составляющей по маршруту навигации (рис. 10).

Оценка ожидаемых характеристик

Для оценки ожидаемой точности макета аппаратуры потребителя системы навигации с использованием измерений ГПЗ и МПЗ была создана программно-математическая модель (рис. 11).



Рис. 11. Программно-математическая модель аппаратуры потребителя системы навигации по геофизическим полям

Программно-математическая модель (ПММ) аппаратуры потребителя предназначена для исследования перспективных методов, средств и технологий навигации, основанных на использовании геофизических полей, в интересах навигации в сложных условиях, в том числе при ограниченной видимости навигационных спутников.

ПММ состоит из следующих блоков:

- БИНС;
- карта приращений ускорения свободного падения (УСП) + измеритель УСП;
- карта приращений вектора магнитной индукции + соответствующий измеритель.

Программно-математическая модель (ПММ) позволяет оценить ожидаемую точность навигации комплексной системы навигации при различных

помеховых воздействиях для территорий, на которых будут происходить испытания макета. В состав модели в качестве исходных данных входят карты вектора магнитной индукции (рис. 10) и карта приращений УСП (рис. 7).

Для оценки ожидаемой точности навигации по всему маршруту навигации сформированы 150 случайных наборов измерений УСП и вектора магнитной индукции в произвольной области с длиной интервала коррекции $\Delta L=5$ км, $\sigma_{\text{измУСП}}=1$ мГал. Частота измерений составляет 2 изм/км и $\sigma_{\text{измH}}=50$ нТл с частотой 10 изм/км. Для каждого набора измерений определены координаты потребителя на основе байесовских оптимальных оценок [6] с использованием совместной обработки гравитационных и магнитных измерений. СКО ошибки составило 540 м.

Кроме того, следует отметить, что в моделировании предполагалось измерение приращения ускорения свободного падения во время движения объекта навигации. Такие измерения возможно выполнять на подвижном основании с использованием системы учета и компенсации активных ускорений по маршруту движения [7].

Заключение

В ходе выполнения исследования было осуществлено:

1. Определение маршрута для отработки технологии навигации по геофизическим полям Земли под условием близости к ФГУП «ВНИИФТРИ» и изрезанности параметров гравитационного и магнитного полей Земли.

2. Формирование навигационной карты параметров гравитационного и магнитного полей Земли по выбранному маршруту «Солнечногорск – Клин – Рогачево – Тараканово – Солнечногорск». Точность навигационной гравиметрической карты составила 1 мГал, навигационной магнитной карты – 50 нТл.

3. Оценка достижимой точности навигации по геофизическим полям при использовании сформированных карт и имеющейся измерительной аппаратуры. Величина составила 540 м.

Следующий этап работы заключается в выполнении полевых измерений и уточнении местоположения транспортного средства в режиме реального времени на основе корректировки БИНС по измерениям бортового гравиметра и магнитометра.

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп.- М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

2. Денисенко О.В., Фатеев В.Ф. Дорожная карта: методы и средства автономной навигации по гравитационному полю. В кн.: Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение. Доклады научно-технической конференции, 14-15 февраля 2017, Менделеево. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017, 360 с.
3. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям.- М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. 328 с.
4. Красовский А.А. Белоглазов И.Н. Чигин Г.П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем.- М.: Наука. Гл. ред. физико-математической литературы, 1979. 448 с.
5. Августов Л.И., Бабиченко А.В., Орехов М.И., Сухоруков С.Я., Шкред В.К. Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве. Под редакцией доктора технических наук, Заслуженного деятеля науки Российской Федерации, профессора Джанджгавы Гиви Ивлиановича.- М.: ООО «Научиздатлит», 2015, 592 с.
6. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. -СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 1998. 369 с.
7. Yu R.; Wu M.; Zhang K.; Cai S.; Cao J.; Wang M.; Wang L. A. New Method for Land Vehicle Gravimetry Using SINS/VEL // Sensors, 2017. 17, 766.