

УДК 52.08, 528.223

РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ЦИФРОВАЯ ЗЕМЛЯ ПОДМОСКОВЬЯ»

В.Ф. Фатеев, Р.А. Давлатов, Д.С. Бобров, М.М. Мурзабеков, Е.А. Рыбаков, В.П. Лопатин, А.О. Долгодуш

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

fateev@vniiftri.ru, davlatov_r_a@mail.ru, bobrov@vniiftri.ru, murzabekov@vniiftri.ru, rybakov@vniiftri.ru, lopatin@vniiftri.ru, dolgodush@vniiftri.ru

Для развития отечественной экономики выполняется национальная программа «Цифровая экономика», для обеспечения которой требуется проведение мероприятий на территории Московской области по разработке цифрового геопространства. Результаты этой работы целесообразно представить в виде отдельного аппаратно-программного комплекса «Цифровая Земля Подмосковья». В работе приводятся результаты разработки аппаратно-программного комплекса, а также представлены направления их использования для решения ряда фундаментальных задач Московской области.

Ключевые слова: цифровая экономика, Подмосковья, аппаратно-программный комплекс, цифровая Земля.

DEVELOPMENT OF THE HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX «DIGITAL OF MOSKOW REGION»

V.F. Fateev, R.A. Davlatov, D.S. Bobrov, M.M. Murzabekov, E.A. Rybakov, V.P. Lopatin, A.O. Dolgodush

Head of Scientific and Technical Center FSUE«VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region

fateev@vniiftri.ru, davlatov_r_a@mail.ru, bobrov@vniiftri.ru, murzabekov@vniiftri.ru, rybakov@vniiftri.ru, lopatin@vniiftri.ru, dolgodush@vniiftri.ru

To develop the domestic economy, the national program «Digital Economy» is being implemented. For its formation, it is necessary to carry out activities in the Moscow region to develop digital geospace. The result is a separate hardware - software complex "Digital Earth of the Moscow Region". The paper presents the results of the development of a hardware and software complex, as well as the directions of their use for solving a number of fundamental tasks of the Moscow region.

Keywords: Digital Economy, Moscow region, hardware and software complex, Digital Earth.

Введение

Новый период в развитии отечественной экономики ознаменовался переходом в информационную эпоху, в которой приоритет отдается информационным ресурсам и коммуникационным процессам. Для осуществления этого перехода выполняется национальная программа «Цифровая экономика», которая требует проведения мероприятий на территории Московской области

по разработке цифрового геопространства. Результаты этой работы целесообразно представить в виде отдельного аппаратно–программного комплекса «Цифровая Земля Подмосковья».

Созданный аппаратно–программный комплекс является одним из ключевых элементов при решении ряда фундаментальных задач Московской области, среди которых стоит отметить:

– выполнение Национальной технологической инициативы (НТИ) для обеспечения распределенных систем беспилотных летательных аппаратов («Аэронет») и автотранспорта («Автонет»);

– сопровождение строительства экономически значимых и уникальных инженерных сооружений, таких как мосты, путепроводы, метро, протонный коллайдер на территории г. Дубна и др.;

– мониторинг состояния водных путей и гидроэлектростанций;

– развития методов обеспечения безопасности перевозок железнодорожным, автомобильным и авиотранспортом;

– совершенствование методов и средств контроля техногенного воздействия на окружающую среду и др.

В целом, выполненные исследования соответствуют следующим приоритетным для Московской области направлениям развития науки, технологий и техники:

1. *Обеспечение безопасности и противодействие терроризму*: в части обеспечения безопасности путей и сообщений.

2. *Информационно-телекоммуникационные системы*: в части формирования цифровой модели гравитационного поля Земли (ГПЗ), уточненной государственной системы координат (ГСК) Подмосковья, единого цифрового банка (ЦБ) измерительных геодезических и гравиметрических данных с глобальной сети пунктов, а также систем обмена информации для обеспечения программы «Цифровая экономика».

3. *Транспортные системы*: в части достижения миллиметрового уровня точности навигационного обеспечения транспортных средств на основе системы ГЛОНАСС в рамках программ «Аэронет» и «Автонет».

4. *Точное машиностроение и проектирование сложных технических систем*: в части высокоточного навигационного обеспечения строительства и мониторинга уникальных инженерных сооружений на территории Подмосковья.

Состав аппаратно–программного комплекса «Цифровая Земля Подмосковья»:

– цифровая модель гравитационного поля и физической поверхности Земли, включающая информационный домен «Подмосковье-ГПЗ»;

– уточненная цифровая модель Государственной геоцентрической системы координат, включающая информационный домен «Подмосковье-ГСК»;

– единый цифровой банк измерительных данных с глобальной сети пунктов, включая измерительные средства информационного домена «Подмосковье-ГеоИнфо»;

– подвижный измерительный комплекс грави-геодезических измерительных средств, предназначенных для формирования и уточнения параметров информационного домена «Подмосковье»;

– система высокоточных грави-геодезических полигонов с Центральным высокоточным полигоном на территории Подмосковья.

Перечень работ, выполненных в процессе создания аппаратно-программного комплекса «Цифровая Земля Подмосковья»:

– измерения ускорения силы тяжести на 148 пунктах на территории Подмосковья с дискретностью 5-7 км с помощью относительных и абсолютных гравиметров, обладающих мировым уровнем точности;

– проведение мониторинга гравитационного поля на территории Солнечногорского района с помощью высокоточных относительных и абсолютных гравиметров;

– создание перебазируемого комплекса новых высокоточных средств измерения в составе: астрономический измеритель неоднородности гравитационного поля, бистатический радиолокатор на сигналах ГЛОНАСС, модернизированный гравитационный градиентометр, а также принципиально новый геодезический измеритель разности ортометрических высот «Квантовый нивелир» на сверхстабильных стандартах частоты и времени;

– формирование полигона уклонов отвесной линии и гравитационного градиента на территории Подмосковья (г.п. Менделеево);

– экспериментальные исследования бистатического радиолокатора на сигналах ГЛОНАСС, предназначенного для контроля безопасности судоходства, противодействия терроризму и контроля водной поверхности в любых погодных условиях независимо от времени суток;

– выполнение оригинального эксперимента по определению разности ортометрических высот на территории Менделеево, а также на базовой линии «Менделеево - Нагатинская пойма»;

– формирование единого цифрового банка данных с мировой сети геодезических и гравиметрических измерительных средств наземного, морского и космического базирования;

– обработка измерительной информации с целью формирования цифровой модели уточненной Государственной системы координат, гравитационного поля Земли, а также формирования доменов «Подмосковье-ГПЗ» и ««Подмосковье-ГСК»»;

– обоснование и формирование системы российских гравиметрических полигонов с центральным полигоном на территории Московской области.

Направления практического применения для Московской области

Разработанный аппаратно-программный комплекс «Цифровая Земля Подмосковья» может быть использована при решении следующих актуальных задач Московской области:

- повышение точности дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС на территории Подмосковья в интересах обеспечения систем «Аэронет» и «Автонет»;
- развертывание производства новых гравиметрических измерителей в Солнечногорском районе: бистатического радиолокатора на сигналах ГЛОНАСС, а также астроизмерителя неоднородности гравитационного поля;
- создание пилотного участка проекта «Квантовый футшток» на территории Московской области, в частности в г. Дубна, который может быть использован для оперативного 3-Д контроля положения элементов коллайдера в период строительства и эксплуатации;
- создание новых средств обеспечения безопасности судоходства и антитеррористического мониторинга на основе применения бистатического радиолокатора на сигналах ГЛОНАСС;
- оцифровка территории и гравитационного поля всех муниципальных образований Московской области.

–

Банк измерительных данных

– Для расчета цифрового проекта уточненной системы координат и моделей физической поверхности Земли был выполнен анализ и сформированы требования к источникам первичной измерительной информации (рис. 1). Сформирован единый цифровой банк «Подмосковье-ГеоИнфо». Банк вошел в «Базу измерительных данных», зарегистрированный в Роспатенте под № 2018621380. Состав банка данных:

- измерительная информация с 408 пунктов с приемниками сигналов ГЛОНАСС за 2014-2018 гг.;
- лазерные измерения спутников с 23 пунктов квантово-оптической системы за 2014-2018 гг.;
- измерения с 53 пунктов сети DORIS за 2014-2018 гг.;
- измерения с 35 пунктов мировой сети радиointерферометров со сверхдлинной базой за 1976-2018 гг.;
- возмущенные орбиты низкоорбитальных космических аппаратов;
- глобальный каталог гравиметрических данных;
- каталог высот физической поверхности Земли (JGM95E, DMA, NASA/GSFC);
- каталог геодезических пунктов с нормальными и геодезическими высотами;

– измерительная информация спутниковых альтиметрических проектов «Торех/Poseidon» (объем данных 10 лет), GEOSAT (объем данных 4 года), ERS-1 (объем данных 3 года), ERS-2 (объем данных 4,5 лет), GFO (объем данных 10 лет).

Разработанный единый цифровой банк данных является уникальным научным достижением, не имеющий аналогов на территории РФ и за рубежом. Впервые в одном месте собрана измерительная информация как геодезических, так и градиентометрических средств.



Рис. 1. Внешний вид измерительных средств

Бистатическая пассивная радиолокационная система

Для контроля безопасности мостов разработана бистатическая пассивная радиолокационная система на основе неизлучающего метода дистанционного зондирования водной поверхности с использованием сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS.

В настоящий момент бистатические системы на основе сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS разрабатываются и используются за рубежом в рамках международного проекта GGOS (Глобальная геодезическая система наблюдений) для анализа приливных явлений и раннего предупреждения о цунами.

Пассивная система обеспечения безопасности надводных мостов способна решать следующие задачи:

1. Получение радиоизображений проходящих судов и их следов на водной поверхности. Задача решается на основе метода обратного синтеза апертуры по сигналам КНС ГЛОНАСС/GPS/Galileo. Ее решение не зависит от времени суток и сезона.

2. Радиолокационный контроль уровня водной поверхности.

3. Контроль уровня взволнованности водной поверхности.

Пассивная радиолокационная система на основе сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS имеет следующие преимущества:

– работа системы в необслуживаемом режиме;

– большое количество одновременно принимаемых сигналов от различных отражающих точек (по количеству видимых навигационных спутников), что обеспечивает высокую точность измерения уровня воды, характеристик волнения;

– небольшой вес размещаемой аппаратуры (не более 2 килограммов), а также малая потребляемая мощность (до 40 Вт);

– обеспечение безопасности судоходства в любое время суток, а также для наблюдения за судоходством (например, с берега или мостов) независимо от погодных условий.

Был выполнен ряд экспериментов по определению уровня водной поверхности на территории Московской области. Схема и место проведения эксперимента показано на рисунке 2.

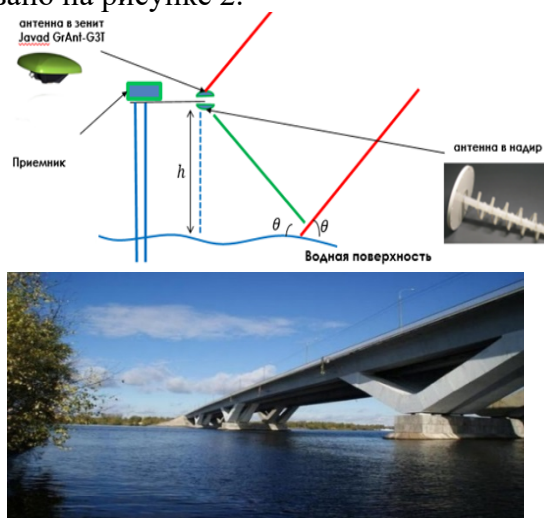
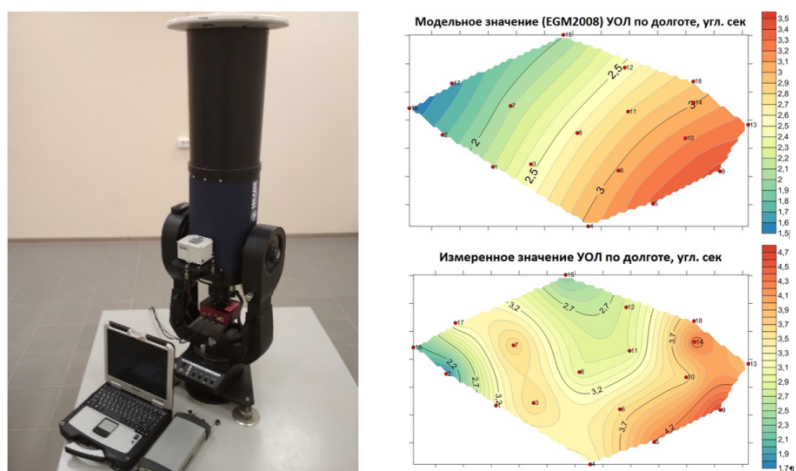


Рис. 2. Схема и место проведения эксперимента

Полигон значений уклонений ответственной линии

В настоящее время обоснован, собран и испытан астроизмеритель неоднородности гравитационного поля Земли (далее астроизмеритель). Астроизмеритель (рисунок 3а) полностью автоматизирован и позволяет определять текущие значения уклонения отвесной линии в режиме реального времени в течение не более 1 часа с погрешностью не хуже 0,2 угл. секунды, что ставит его на один уровень с лучшими зарубежными аналогами. Указанная погрешность была достигнута на основе созданной новой методики.



а) Вид макета астроизмерителя б) Пример измеренной и модельной карт УОЛ

Рис. 3

Впервые на территории Московской области сформирован микрополигон значений уклонений отвесной линии, которые впоследствии были сравнены с расчётными значениями по модели ГПЗ. По результатам сравнения на территории Подмоскovie обнаружены ранее неизвестные существенные локальные аномалии уклонений отвесной линии (рис. 3б).

Астроизмеритель неоднородности гравитационного поля обладает уникальными метрологическими характеристиками и позволяет повысить степень автоматизации, оперативность и точность измерений уклонений отвесной линии. Высокоточные измерения уклонений отвесной линии необходимы, в частности, для внесения поправок в показания гиротеодолитов, которые используются для ориентирования подземной геодезической сети. Этот процесс является одной из самых ответственных работ, выполняемых при строительстве туннелей метро. В настоящее время значения уклонений отвесной линии вычисляются на основе карт. Использование астроизмерителя позволит создавать карты, которые существенно точнее существующих.

Полигон значений гравитационных градиентов

На сегодняшний день обоснован и сформирован эталонный микрополигон значений гравитационных градиентов с использованием гравитационного градиентомера (рис. 4), а также обосновано направления его модернизации.

Выполнен следующий комплекс работ по автоматизации измерителя гравитационных градиентов на основе крутильных весов Кавендиша:

- заменил механизм арретирования чувствительного элемента и поворотное устройство на основе часового механизма на шаговые двигатели;
- заменил систему съема положения чувствительного элемента на оптическую ПЗС-камеру высокого разрешения;
- установил современные платы управления и обработки сигнала для осуществления удаленного управления.

Выполненная модернизация позволила:

- уменьшить продолжительность периода измерений;
- увеличить точность измерения гравитационных градиентов;
- обеспечить автоматизацию процесса измерений.

При помощи разработанного модернизированного измерителя выполнены

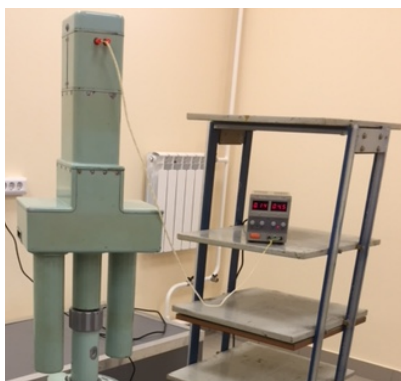


Рис. 4. Внешний вид модернизированного гравитационного градиентометра

работы по созданию эталонного микрополигона значений гравитационных градиентов на территории Солнечногорского района, а также гравитационно-градиентометрических карт. Градиентометрические карты являются эффективным средством высокоточного обнаружения подземных пустот и изучения геологических особенностей рассматриваемого района. Создание градиентометрических карт необходимы при строительстве уникальных сооружений, а также полотен автомобильных и железных дорог. Таким образом, разработка цифровых гравиметрических карт с использованием автоматизированного гравитационно-

го градиентометра позволит значительно снизить риски нарушения конструкций сооружений и дорог при их непосредственной эксплуатации на территории Подмосковья.

Система «Квантовый нивелир»

Геоид и его высота над поверхностью референц-эллипсоида является одной из важнейших характеристик формы Земли. Высоту геоида можно легко определить по разности геодезической и ортометрической высот точек физической поверхности Земли. Однако прямые геодезические методы непосредственного измерения ортометрических высот ранее не были известны.

Такая возможность открывается при измерении эффектов гравитационного смещения частоты и гравитационного замедления времени «Квантовый нивелир». Эти эффекты проявляются в том, что в гравитационном поле временные шкалы и частоты двух высокостабильных стандартов частоты и времени (СЧВ), расположенных в разных точках, различаются. Разность временных шкал и частоты несет информацию о разности ортометрических

высот двух СЧВ.

Впервые в России в 2015-2016 гг. экспериментально измерены перечисленные выше эффекты. Эксперименты заключались в сличении шкал времени Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012 и шкалы времени подвижного СЧВ «Сапфир» при их размещении в двух точках: в Менделеево и в Нагатинской пойме (рис. 5). Разность высот составила «минус 100 м».

В эксперименте искомое значение гравитационного эффекта смещения времени составило $\Delta\tau_{GR} = -0,71 \pm 0,3$ нс при расчетном значении $-0,95$ нс. Это соответствует измеренной разности ортометрических высот 75 ± 32 м.

При использовании оптических СЧВ с относительной нестабильностью частоты 10^{-17} и лучше, разрабатываемых во ФГУП «ВНИИФТРИ», появляется возможность мониторинга просадки грунта во время строительства и эксплуатации уникальных и экономически важных объектов. В частности, это может быть использовано при высокоточных геодезических измерениях на создаваемом коллайдере протонов и тяжёлых ионов, который строится в г. Дубна.



Рис. 5. Внешний вид макета «Квантовый нивелир»

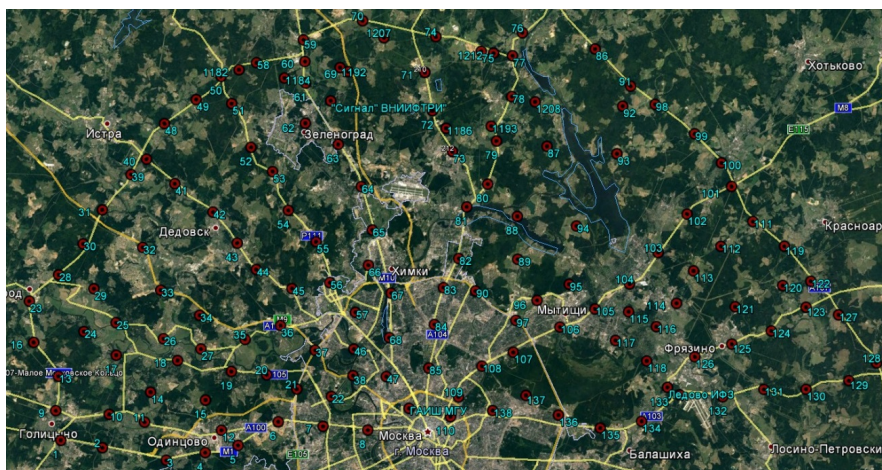


Рис. 6. Ситуационный план измерений на 148 пунктах Центрального высокоточного полигона на территории Подмосквья

Результаты научных исследований

В процессе создания АПК «Цифровая Земля Подмосквья» получены следующие результаты:

1. Сформирован единый цифровой банк разнородной измерительной информации с мировой сети средств геодезии и гравиметрии «Подмосквье-ГеоИнфо», не имеющий аналогов как на территории Российской Федерации (РФ), так и за рубежом.

2. Рассчитана уточненная цифровая модель Государственной системы координат с погрешностью 41 мм «Подмосквье-ГСК». Ранее этот параметр составлял более 50 мм.

3. Рассчитана цифровая модель глобального гравитационного поля с разрешением 56 км (ранее этот параметр составлял 110 км) и высот физической поверхности Земли с погрешностью 90 мм (ранее этот параметр составлял более 1 метра), и сформирован информационный домен «Подмосквье-ГПЗ».

4. Впервые сформирован уникальный высокоточный грави-геодезический полигон на территории Подмосквья для верификации государственных геодезических систем координат и моделей параметров гравитационного поля.

5. Впервые в РФ разработан метод нивелирования на основе высокостабильных стандартов частоты и времени «Квантовый нивелир» и проведен ряд успешных экспериментов.

6. Впервые в РФ разработан и успешно испытан новый метод

обеспечения безопасности судоходства на основе бистатического радиолокатора, использующего сигналы ГНСС для радиоподсвета целей.

7. Впервые на территории Подмосковья с использованием специального разработанного высокоточного астрономического измерителя неоднородности гравитационного поля сформирован микрополигон значений уклонений отвесной линии.

8. Модернизирован высокоточный горизонтальный градиентометр и сформирован эталонный микрополигон значений гравитационных градиентов.

Вывод

Аппаратно-программный комплекс «Цифровая Земля Подмосковья» разработанный в ходе выполнения исследований коллективом авторов ФГУП «ВНИИФТРИ», является уникальным объектом, который не имеет аналогов на территории Российской Федерации и за рубежом. Аппаратно-программный комплекс является основой цифрового банка геопространственных данных Подмосковья и должен развиваться с дискретностью 1-2 км с охватом каждого муниципального образования Московской области. Полученный научный и инструментальный задел позволяет решить эту задачу в ближайшие 3-4 года.