

УДК 528.223, 528, 83

## КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ГНСС-РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

В.П. Лопатин, В.Ф. Фатеев

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

lopatin@vniiftri.ru,

fateev@vniiftri.ru

*Космический бистатический ГНСС-радиоальтиметр является перспективным измерительным средством для определения модели геоида над акваторией Мирового океана. С запуском новых спутников ГНСС качество и объём исходных данных увеличиваются. В данной работе представлен анализ методов и результатов проводимых космических экспериментов по ГНСС-рефлектометрии.*

*Ключевые слова: геоид, спутниковая альтиметрия, GNSS-R, бистатическая радиолокация.*

## CONCEPT OF THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF GNSS-REFLECTOMETRY

V.P. Lopatin, V.F. Fateev

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region

lopatin@vniiftri.ru,

fateev@vniiftri.ru

*The bistatic GNSS radio altimeter is a promising measuring tool for determining the models of the geoid over the ocean. The quality and volume of the source data increases with the launch of new GNSS satellites. The article discusses an analysis of ongoing space experiments on GNSS-reflectometry and methods of GNSS radio altimetry.*

*Key words: geoid, space altimetry, GNSS-R, bistatic radiolocation.*

### Введение

В настоящее время спутниковая радионавигация рассматривается как одна из важнейших технологий координатно-временного и навигационного обеспечения. С развитием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) рассматриваются новые возможности и способы их широкого применения.

ГНСС-рефлектометрия (*GNSS-reflectometry*) — метод пассивной бистатической радиолокации, основанный на использовании спутников ГНСС в качестве передатчиков [1–3]. Данный метод может быть использован для решения следующих задач:

- определения уровня водной поверхности (альтиметрия);
- определения степени взволнованности водной поверхности (скаттерометрия);

- определения скорости и направления приповерхностного ветра (скаттерометрия);
- построения радиоизображений;
- определения состояния льдов;
- измерения влажности почв;
- определения солёности воды.

### **Активная спутниковая альтиметрия**

Определение высоты геоида представляет собой одну из основных задач геодезии, гравиметрии и океанографии. Геоид — это поверхность равного гравитационного потенциала на фигуре Земли, содержащая пункт, принятый за начало счёта высот. Поверхность геоида совпадает с поверхностью Мирового океана при отсутствии возмущающих сил, таких как ветер, океанические течения и приливы, и условно продолжается под материками. При описании формы геоида прибегают к понятию высоты геоида — возвышения геоида над эллипсоидом.

В настоящее время основным средством получения информации о реальной топографии взволнованной морской поверхности из космоса являются радиоальтиметры. Классический радиоальтиметр представляет собой радиолокационный дальномер. При его размещении на борту космического аппарата (КА) по времени задержки РЛ-сигнала, излучённого и принятого после отражения от поверхности, определяется высота КА-носителя относительно отражающей поверхности. Такой радиолокатор иногда называется монолокатором (по числу точек приёма — излучения). Таким образом, если КА измеряет свою высоту над поверхностью океана, а также если известна высота над эллипсоидом (геодезическая), то может быть вычислена высота геоида. Положение КА на орбите во время измерений контролируется с помощью лазерных и радиотехнических средств, а также с помощью навигационной аппаратуры потребителя (НАП) ГНСС.

В развитии метода радиоальтиметрического определения урвенной поверхности исследователи обычно рассматривают три этапа:

- период с 1974 по 1980 г. (первый этап) — исследованы возможности спутниковой альтиметрии в геодезии. Основные этапы работ этого периода были направлены на изучение средней поверхности Мирового океана или геоида;
- период с 1985 по 1992 г. (второй этап) — проведены эксперименты для решения геодезических задач и исследования возможностей применения альтиметрических измерений в океанологии, гляциологии, гидрологии и т.д.;
- период с 1993 г. по настоящее время (третий этап) — совершён переход от экспериментальных работ к проведению постоянного мониторинга поверхности Мирового океана с помощью альтиметрических систем.

В эти периоды реализовано свыше 15 национальных и международных проектов в области спутниковой альтиметрии, в том числе отечественные проекты ГЕО-ИК и ГЕО-ИК-2. Альтиметрические миссии приведены в таблице 1.

Таблица 1  
Существующие и будущие зарубежные альтиметрические миссии

Миссия	Альтиметр	Основные параметры
GEOSAT	GEOSAT	13,5 ГГц, 800 км
ERS-1, ERS-2	RA	13,8 ГГц, 780 км
TOPEX/Poseidon	Poseidon-1/TOPEX NRA	13,65/5,3 ГГц, 1336 км
GFO-1	GFO-RA	13,5 ГГц, 880 км
Jason-1	Poseidon-2	13,575/5,3 ГГц, 1336 км
Envisat	RA2	13,575/3,2 ГГц, 800 км
Jason-2	Poseidon-3A	13,575/5,3 ГГц, 1336 км
SARAL (2013)	AltiKa	35,75 ГГц, 800 км
Jason-3	Poseidon-3B	13,575/5,3 ГГц, 780 км
Sentinel-3	SRAL SAR	13,575/5,41 ГГц, 815 км
SWOT	Poseidon-3C	13,575/5,3 ГГц,
CryoSat-2	SIRAL	13,575 ГГц, 720 км
Jason-CS/Sentinel-6	Poseidon-4	13,575/5,41 ГГц, 1336 км

Современное состояние развития спутниковой альтиметрии позволяет успешно использовать альтиметрические данные при решении различных геодезических задач. В число этих задач входят: уточнение глобальных моделей геопотенциала; определение детальных характеристик гравитационного поля Земли (ГПЗ) в Мировом океане в виде цифровых моделей высот геоида, уклонов отвесных линий, аномалий силы тяжести; установление и поддержание общеземной системы высот.

Спутниковые альтиметры на основе монолокации обладают инструментальной погрешностью измерений до 1 см и позволяют избежать проведения дорогостоящих гравиметрических съёмок на поверхности Мирового океана. Вместе с тем существующая спутниковая альтиметрия имеет следующие недостатки:

- бортовой радиоальтиметр требует электропитающего устройства большой мощности, большого веса и больших габаритных размеров;
- за один проход КА-носителя реализуется только один трек наблюдения текущего профиля высоты, вследствие чего обеспечивается невысокий пространственный охват.

Для устранения этих недостатков предлагается использовать бистатистический метод спутниковой альтиметрии, основанный на использовании сигналов ГНСС, отражённых от поверхности океана. При таком методе измерения

высоты полностью исключается бортовое передающее устройство со всеми его недостатками, а также обеспечивается большой пространственный охват вследствие множества сигналов спутников ГНСС.

### Бистатическая ГНСС-альтиметрия

В настоящее время отечественный космический радиоальтиметр на принципе монолокации пока не создан. Поэтому космический бистатический ГНСС-радиоальтиметр может стать самостоятельной системой уточнения формы геоида и характеристик отражающей водной поверхности на акватории.

Принцип работы бистатической альтиметрической системы на основе сигналов ГНСС основывается на приёме прямых и отражённых сигналов навигационных космических аппаратов (НКА). Прямые сигналы принимаются слабонаправленной антенной, направленной в «зенит» (рис. 1). Отражённые от поверхности океана сигналы в окрестности точки зеркального отражения принимаются антенной, направленной в «надир». Чтобы решить задачу определения высоты до отражающей поверхности, необходимо определить разность времени распространения прямого и отражённого сигналов, координат и скоростей приёмника и НКА. Кроме того, необходимо знать мощность принимаемого сигнала, модель отражающей поверхности, тропосферную и ионосферную задержки [4–6].

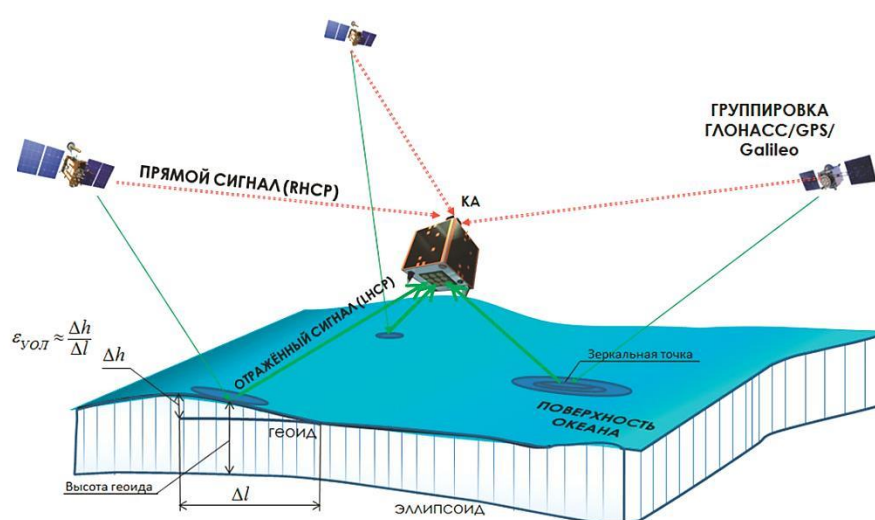


Рис. 1. Принцип работы бистатического радиовысотомера на основе отражённых сигналов ГНСС

Такая система, использующая отражённые сигналы ГНСС, имеет неоспоримое преимущество перед классической моностатической альтиметрией

*Альманах современной метрологии, 2020, № 2 (22)*

за счёт большого количества одновременно принимаемых отражённых сигналов от всех видимых спутников ГНСС. За один проход КА-носителя с бистатическим альтиметром возможно одновременное получение до 20–30 треков профиля высоты геоида (по числу видимых навигационных спутников радиоподсвета из числа ГЛОНАСС/GPS/Galileo/BeiDou). Таким образом, повышается пространственный охват акватории за один сеанс измерений [7] (рис. 2). 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.

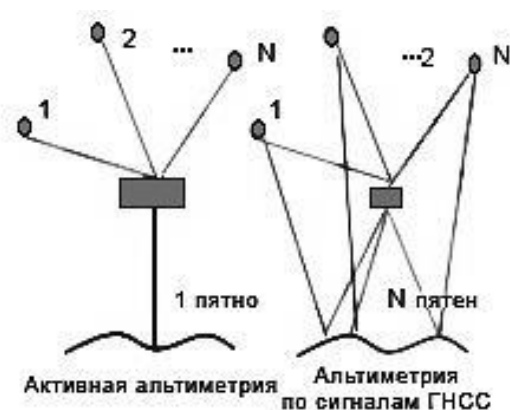


Рис. 2. Схемы классической альтиметрии и альтиметрии на основе сигналов ГНСС

## Методы бистатической ГНСС-радиоальтиметрии

### *Кодовый метод*

Кодовый метод можно назвать традиционным. Так же, как и коммерческие приёмники, приёмник бистатической альтиметрической системы определяет псевдодальности и псевдодоплеровские смещения для прямого и отражённого сигналов. Принимаемый прямой и отражённый сигналы подвергаются корреляционной обработке с локальной копией открытого сигнала, генерируемого в приёмнике. В таком методе игнорируются зашифрованные информационные компоненты сигналов. При этом снижается достижимая точность метода бистатической ГНСС-альтиметрии.

### *Интерференционный метод*

Чтобы преодолеть это ограничение кодового метода может быть использован интерференционный метод. Он основан на взаимной корреляционной обработке прямого и отражённого сигналов от одного НКА, принимаемого двумя антеннами с высоким коэффициентом направленного действия. Такие антенны служат для пространственного селектирования принимаемых сигналов.

**Метод отношения сигнал/шум (С/Ш)**

При использовании метода С/Ш анализируется изменение отношения уровня сигнала к шуму в зависимости от угла возвышения спутника, длины волны сигнала и высоты размещения приёмной антенны. Измерения данным методом могут быть реализованы с использованием одной антенны, ориентированной в «горизонт» для приёма прямых и отражённых сигналов ГНСС. Зависимость значения С/Ш от высоты размещения приёмной антенны имеет следующий вид:

$$\Delta SNR \sim A \cos(\varphi_{R_i}(t) + \varphi_0) = A \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} h \cos(\theta(t)) + \varphi_0\right),$$

где  $\theta(t)$  — угол возвышения  $i$ -го спутника в момент времени  $t$ ;  $\lambda$  — длина волны сигнала;  $h$  — высота до отражающей поверхности;  $\varphi_0$  — начальная фаза;  $A$  — амплитуда суммарного сигнала.

**Фазовый метод**

Фазовые измерения имеют более высокую точность, нежели кодовые, но такие измерения неоднозначны из-за неопределённости начального целого числа периодов фазового сдвига. Но если необходимо определить изменение (приращение) высоты до отражающей поверхности, то фазовые измерения могут быть использованы как более точные.

Изменение высоты пропорционально изменению разности псевдофаз:

$$\Delta h = \frac{\Delta\varphi_i}{2 \sin \theta_i} - \frac{\Delta\varphi_j}{2 \sin \theta_j},$$

где  $\Delta\varphi$  — разность псевдофаз прямого и отражённого сигналов. Необходимо, чтобы при измерениях выполнялся критерий Релея. Критерий Релея выполняется при низких углах возвышения НКА. Точность фазовых измерений может составить менее сантиметра.

**Экспериментальные исследования космической ГНСС-рефлектометрии**

В методе ГНСС-рефлектометрии отражённый сигнал полезен для целей мониторинга окружающей среды. С помощью GNSS-R возможно измерение уровня морской поверхности, приповерхностного ветра, солёности морской воды, измерение плотности льда, влажности почвы [8–10].

Первое «бортовое» наблюдение в условиях космоса отражённых сигналов ГНСС было реализовано при использовании антенны с коэффициентом усиления около 38 дБ и с размерами  $12 \times 3$  м, установленной в отсеке космического корабля Шаттл, с полосой пропускания приёмного тракта до 40 МГц. При этом были зарегистрированы сигналы GPS и сигналы ГЛОНАСС, отражённые от морской поверхности [11].

Возможность приёма отражённых сигналов ГНСС также была проверена с использованием радиозатменной аппаратуры спутника CHAMP, запущен-

ного в 2000 г. и проработавшего 10 лет [12–13]. Альтиметрические измерения высоты средней поверхности океана были проведены с использованием анализа амплитудных и фазовых изменений отражённого ГНСС-сигнала при различных углах возвышения НКА. Ошибка измерений высоты кодовым (корреляционным) методом составила  $\pm 0,7$  м [14]. Достигнутая инструментальная погрешность когерентного (фазового) метода была определена в результате многократных измерений приращения разности псевдофаз прямого и отражённого сигналов и составила от  $\pm 0,02$  до  $\pm 0,25$  см [15], что существенно меньше величины ошибок корреляционного метода. Однако, как отмечалось, фазовый метод имеет ряд ограничений.

В 2001 г. компанией SSTL были начаты исследования в области GNSS-R. В 2003 г. был запущен спутник UK-DMC. Данный спутник имел массу около 100 кг, высоту орбиты 680 км и в свой состав включал экспериментальную аппаратуру GNSS-R. За восьмилетний период был собран объём информации, в который вошло около 60 различных типов данных, полученных при отражении от различных поверхностей. На момент существования спутника в недостаточной мере была исследована связь параметров отражённого сигнала от параметров взволнованности поверхности. В дальнейшем по собранным данным были оценены среднеквадратические уклоны морской поверхности (*MSS*), высота значимой волны (*SWH*), скорость приповерхностного ветра ( $U_{10}$ ) и средний уровень поверхности (*MSL*). Следовательно, экспериментальная аппаратура применяется как для альтиметрии (*SWH*, *MSL*), так и скаттерометрии (*MSS*,  $U_{10}$ ). Миссия показала различия в теоретических и экспериментальных данных, которые связаны либо с бортовой аппаратурой, либо с процессами, не учитываемыми в модели. Основным ограничением аппаратуры UK-DMC был малый объём данных, которые представлялись в виде 20-секундных выборок (128 Мбайт). Но данных было достаточно, чтобы продемонстрировать связь между отражённым сигналом ГНСС и характеристиками отражающей поверхности [16].

С 2010 г. компанией SSTL разрабатывается спутник TechDemoSat-1 (рис. 3). В 2014 г. спутник был запущен в качестве вторичной нагрузки на ракетоносителе «Союз-2-1б» на орбиту с высотой 630 км, наклоном  $98,8^\circ$  и периодом обращения 97,3 минут. Масса спутника составила 157 кг. Его основной полезной нагрузкой является приёмник SGR-ReSI — прибор дистанционного зондирования с использованием сигналов GPS/Galileo L1 или GPS L2C/Galileo E5ab. Основной измерительной информацией данного прибора были диаграммы рассеяния (зависимость мощности от доплеровского смещения частоты и временной задержки или *DDM* — *delay-doppler map*). Цели данной миссии были направлены в основном на определение характеристик взволнованности морской поверхности и скорости приповерхностного ветра.

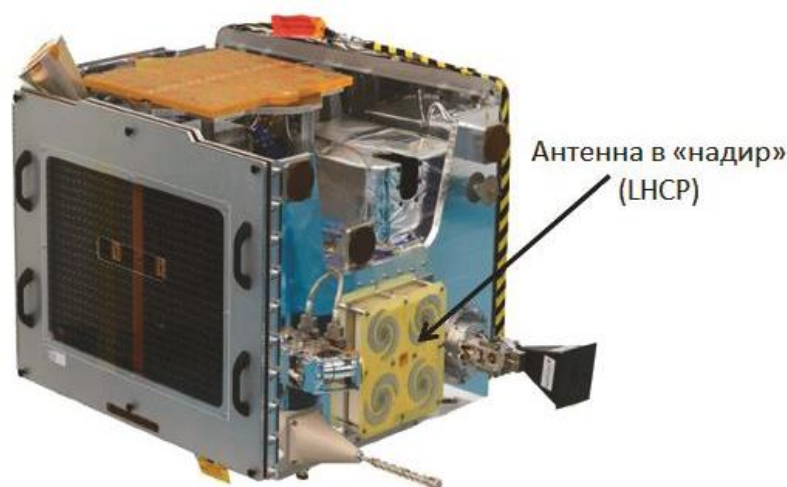


Рис. 3. Внешний вид спутника TechDemoSat-1

Для декодирования отражённого сигнала в приёмнике SGR-ReSI прямые сигналы используются как опорные. Оцифрованный сигнал поступает на вход смесителя, а затем проходит процедуру быстрого преобразования Фурье, после чего рассчитываются строки DDM. Для получения 7000 каналов в корреляторе необходимо провести когерентное накопление за период времени более 1 мс. Каждый отсчёт затем должен быть некогерентно накоплен в течение времени не менее 100 мс, чтобы получить превышение полезного сигнала над шумами. Так как данная операция производится на борту, то объём хранимой информации уменьшается, а число одновременно обрабатываемых отражённых сигналов от различных спутников ГНСС возрастает.

Бортовая аппаратура миссии TechDemoSat-1 послужила основой для будущей спутниковой группировки малых космических аппаратов CYGNSS [17].

В начале 2015 г. запущен спутник SMAP, который имеет антенну диаметром 6 метров с коэффициентом усиления 36 дБ (рис. 4). В процессе экспериментальных исследований спутниковый приёмник был настроен на частоту GPS L2 для приёма и обработки сигналов GPS, отражённых от Земли. Проведённый эксперимент предоставил уникальные поляриметрические данные для изучения механизмов рассеяния, которые нельзя наблюдать при более низком усилении антенн.

В конце 2016 г. был запущен испанский спутник CubeSat 3Cat2 для выполнения альтиметрических измерений океана с использованием технологии GNSS-R. Основной полезной нагрузкой является бистатический 2-диапазонный альтиметр с правой и левой круговой поляризацией PUSCARO [18]. Результаты измерений в открытом доступе нет.





Рис. 4. Внешний вид спутника SMAP

CYGNSS (*Cyclon Global Navigation Satellite System*) — это спутниковая группировка под управлением NASA [19] (рис. 5). В конце 2016 г. были запущены 8 спутников миссии CYGNSS. Миссия направлена на изучение тропических циклонов, а также различных параметров морской поверхности. Группировка может обеспечивать обзор океана намного чаще, чем один большой спутник. Была выбрана концепция заполняющих трасс, охватывающая диапазон широт  $\pm 35^\circ$ , со средним временем повторной съёмки — 4 часа. Все 8 аппаратов находятся в одной орбитальной плоскости, высота орбиты составляет 510 км. Из-за несинхронности орбит спутников ГНСС и CYGNSS время повторной съёмки описывается распределением вероятностей, для которого медианное значение времени повторной съёмки составляет 2 часа, а математическое ожидание составляет 6 часов. Система способна предоставлять данные для дальнейшего получения среднего уровня морской поверхности, степени волнения и скорости приповерхностного ветра. Погрешность измерения скорости приповерхностного ветра составляет не хуже  $\pm 2$  м/с, погрешность определения направления — не хуже  $\pm 20^\circ$ .



Рис. 5. Внешний вид спутника CYGNSS

На рисунке 6 представлены результаты фазовых альтиметрических измерений космической бистатической ГНСС-системы CYGNSS по двум независимым проходам над озером Цинхай [20]. Поскольку водная поверхность большого озера приближается к эквипотенциальной поверхности силы тяжести, то альтиметрические измерения над озером могут дать независимую оценку высоты геоида вдоль трека. Данные измерения являются относительными из-за неизвестного целого числа фаз. Полученные измерения после введения всех необходимых поправок сравнивались с моделью EGM2008 вдоль трека. Результаты измерений хорошо повторяют EGM2008, но выделяются аномалии  $\pm 10$  см, которые повторяются в разные проходы и для разных спутников ГНСС.

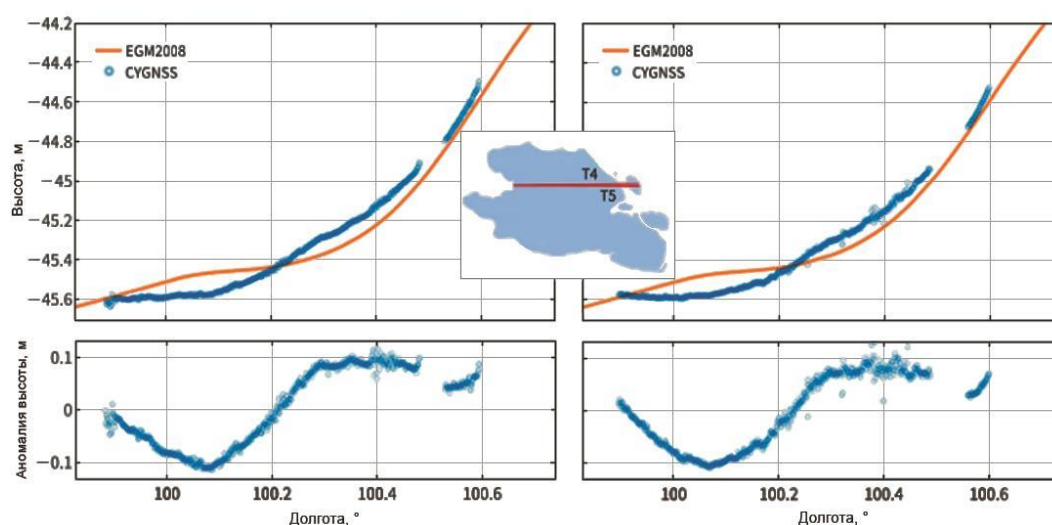


Рис. 6. Результаты измерений профиля геоида системой CYGNSS над солёным о. Цинхай

5 июня 2019 г. Китай запустил два экспериментальных малых космических аппарата BF-1A и BF-1B. Работа спутников направлена на всепогодное изучение Мирового океана с помощью отражённых сигналов ГНСС. Морское поверхностное распределение ветра является одним из ключевых факторов раннего предупреждения и прогноза тайфунов. Спутники также имеют перспективы применения в мониторинге уровня поверхности океана (профиля геоида), ледников, снежного покрова.

К данному моменту были запущены и планируются следующие миссии, использующие GNSS-R:

- эксперименты с борта CHAMP (2000 г.);
- UK-DMC1 (2003 г.);
- TechDemoSat-1 (2014 г.);
- эксперименты с борта SMAP (2015 г.);

- 3Cat2 CubeSat (2016 г.);
- CYGNSS (2016 г.);
- WNISAT 1R (2017 г.);
- эксперименты с борта спутников Spire Global;
- BF-1 (2019 г.);
- GEROS-ISS (с 2020 г.);
- G-TERN (с 2025 г.).

На борту Международной космической станции планируется проведение эксперимента Geros-ISS с 2020 г. Основными задачами эксперимента являются: измерение высоты Мирового океана; определение степени волнения, которая связана со скоростью и направлением приповерхностного ветра. В настоящее время проведены моделирование и эксперименты с использованием интерференционного метода по определению высоты Балтийского моря в районе Хельсинки [21]. Проведённые исследования показывают, что космический эксперимент даст данные, которые не могут быть смоделированы в наземных условиях.

#### ***Отечественные исследования и эксперименты***

Среди отечественных работ стоит выделить работу специалистов под руководством В.Ф. Фатеева по созданию образцов наземного и воздушного радиолокаторов с синтезированной апертурой, использующих отражённые сигналы ГЛОНАСС. В ходе лётных экспериментов были получены радиолокационные изображения отражающей водной поверхности и надводных объектов с 7 ракурсов одновременно, по числу видимых спутников ГЛОНАСС. В данном случае принимались диффузно-отражённые сигналы [22].

Также были проведены наземные эксперименты по определению уровня водной поверхности с моста над водохранилищем. Эксперименты проводились с помощью серийной аппаратуры, что наложило ограничения по точности полученных измерений [23].

#### **Выводы**

За несколько десятилетий развития спутниковая альтиметрия шагнула далеко за рамки классических геодезических задач, которые были поставлены перед ней на первом этапе её становления. Дальнейшим развитием альтиметрии может стать бистатическая альтиметрическая система на основе сигналов от спутников ГНСС. Вывод на орбиту такой системы позволит не только повысить пространственное и временное разрешение альтиметрических измерений, но и существенно расширит круг задач, решаемых с использованием этого типа данных. При космическом базировании ГНСС-альтиметра точность определения высоты может достигать менее 0,1 м.

### Литература

1. Сахно И.В., Ткачев Е.А., Гаврилов Д.А., Успенский К.К. Малый космический аппарат обзора морской поверхности с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем // Изв. ВУЗов. Сер. «Приборостроение». 2009. 52. № 4. С. 34–39.
2. Awange J. GNSS Reflectometry and Applications // GNSS Environmental Sensing. Environmental Science and Engineering. Cham: Springer, 2018.
3. Jin S., Komjathy S. GNSS reflectometry and remote sensing: new objectives and results // Advances in Space Research. 2010. No. (2). P. 111–117.
4. Zavorotny V.U., Voronovich A.G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2000. 38. P. 951–964.
5. Gleason S.T., Hodgart S., Yiping S., Gommenginger C.P., Mackin S., Adjrard M., and Unwin M. Detection and processing of bistatically reflected GPS signals from low Earth orbit for the purpose of ocean remote sensing // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2005. 43. P. 1229–1241.
6. Shuanggen Jin, Estel Cardellach, Feiqin Xie GNSS Remote Sensing. P. 175–214.
7. Фатеев В.Ф., Давлатов Р.А., Лопатин В.П. Навигационная аппаратура ГНСС на борту наноспутника: возможности применения // Известия вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 5. С. 437–445.
8. Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS remote sensing. Theory, methods, and applications. Dordrecht: Springer, 2014.
9. Martín-Neira M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to Ocean altimetry // ESA J. 17(4). 1993. P. 331–335.
10. Lowe S.T., Zuffada C., Chao Y., Kroger P., Young L.E., LaBrecque J.L. 5-cm-precision aircraft ocean altimetry using GPS reflections // Geophys. Res. Lett. 29(10):1375. 2002.
11. Lowe S.T., LaBrecque J.L., Zuffada C., Romans L.J., Young L.E., Hajj G.A. First spaceborne observations of an Earth-Reflected GPS signal. Radio Science, 2002.
12. Wagner C., Klokochnik J. The value of ocean reflections of GPS signals to enhance satellite altimetry: Data distribution and error analysis // J. Geodesy. 2003. 77. P. 128–138
13. Beyerle G., Hocke K. Observation and Simulation of Direct and Reflected GPS Signals in Radio Occultation Experiment // J. Geophys. Res. Lett. 2001. 28. P. 1895–1898.
14. Beyerle G., Hocke K., Wickert J., Schmidt T., Reigber C. GPS radio occultation with CHAMP: A radio holographic analysis of GPS signal propagation in the troposphere and surface reflections // J. Geophysical Research. Lett. 2001. 107. 4802.

15. Montenbruck O., Remco K. In-flight performance analysis of the CHAMP BlackJack GPS Receiver // *GPS Solution*. 2003. V. 7. P. 74–86.
16. Clarizia, M.P., Gommenginger C.P., Gleason S.T., Srokosz M.A., Galdi C., Bisceglie M. Analysis of GNSS-R delay-Doppler maps from the UK-DMC satellite over the ocean // *Geophysical Research Letters*. 36. 2009.
17. Li W., Rius A., Fabra F., Cardellach E., Ribó S., Martín-Neira M. Revisiting the GNSS-R Waveform Statistics and Its Impact on Altimetric Retrievals // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2018. V. 56. No. 5. P. 2854–2871.
18. Castellvi E.J., Camps A., Corbera J., Alamus R. 3Cat-3/MOTS Nanosatellite Mission for Optical Multispectral and GNSS-R Earth Observation: Concept and Analysis. *Sensors*. 18. 140. 2018.
19. Ruf C.S., Chew C., Lang T., Morris M.G., Nave K., Ridley A., Balasubramanian R. A New Paradigm in Earth Environmental Monitoring with the CYGNSS Small Satellite Constellation // *Scientific Reports*. DOI: 10.1038/s41598-018-27127-4, 2018.
20. Li W., Cardellach E., Fabra F., Ribó S., Rius A. Lake Level and Surface Topography Measured with Spaceborne GNSS-Reflectometry from CYGNSS Mission: Example for the Lake Qinghai // *Geophysical Research Letters*. 2018.
21. Wickert J., Cardellach E., Andersen O., Bandejas J. GNSS Reflectometry onboard the International Space Station with Geros-ISS: Review of activities and current status // *Materials of IAG-IASPEI: Kobe*. 2017.
22. Фатеев В.Ф., Ксендзук А.В., Обухов П.С., Крапивкин Г.И., Тимошенко Г.В., Король Г.Н., Новиков В.А., Герасимов П.А., Шахалов К.С. Экспериментальный бистатистический радиолокационный комплекс // *Радиотехника*. 2012. Электромагнитные волны и электронные системы. № 5. Т. 17.
23. Фатеев В.Ф., Лопатин В.П. Космический бистатистический радиолокатор контроля профиля поверхности океана на основе сигналов ГНСС // *Известия вузов. Приборостроение*. 2019. Т. 62. № 6.