

ПРИМЕНЕНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ГНСС НА БОРТУ НАНОСПУТНИКА

В. Ф. ФАТЕЕВ, Р. А. ДАВЛАТОВ, В. П. ЛОПАТИН

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
141570, Менделеево, Московская обл., Россия
E-mail: fateev@vniiftri.ru*

Исследуются возможности использования наноспутника с бортовым приемником сигналов глобальных навигационных спутниковых систем для определения параметров гравитационного поля Земли. Рассматриваются конфигурации космических измерителей на базе наноспутников — спутникового гравиметра, космического градиентометра по линии „спутник — спутник“ и бистатического радиовысотометра.

Ключевые слова: *малый космический аппарат, наноспутник, глобальные навигационные спутниковые системы, параметры гравитационного поля Земли, космический гравиметр, космический градиентометр*

Введение. Малые космические аппараты (МКА) класса наноспутник могут использоваться как для отработки технических решений, космической связи, радиопросвечивания ионосферы и т.д., так и для определения параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ) и детектирования крупных пространственных и временных его вариаций.

До 2000 г. единственной возможностью определения параметров гравитационного поля Земли в глобальном масштабе было использование активных спутниковых радиовысотометров и данных дальномерных измерений по линии „наземная станция — спутник“. В последующее десятилетие за рубежом были запущены три геодезических космических аппарата (КА), предназначенные для определения вариаций ГПЗ и использующие измерения сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) бортовыми приемниками, измерения негравитационных ускорений с помощью акселерометров, а также дальномерные измерения от наземных станций:

- CHallenging Minisatellite Payload (CHAMP), запущен в 2000 г. [1];
- Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE), запущен в 2002 г. [2];
- Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE), запущен в 2009 г. [3].

Эксплуатация спутников способствовала созданию современных высокоточных моделей ГПЗ. Помимо определения стационарной части гравитационного поля Земли существует потребность в мониторинге вариаций параметров ГПЗ для изучения изменения климата вследствие крупномасштабных взаимодействий океана и атмосферы [4], контроле баланса масс ледников и акваторий Мирового океана [5], мониторинге крупных тектонических движений [6, 7]. Таким образом, необходимы постоянный запуск, контроль и поддержка специальных геодезических космических аппаратов.

Космические аппараты CHAMP, GRACE, GOCE — сложные технические проекты, разработка которых осуществлялась несколькими десятками научных групп мира, а стоимость изготовления достигает 30—40 млрд руб. Отдельной статьей расходов является поддержка специального центра управления полетом.

Рассматриваемые в настоящей статье конфигурации космических измерителей на базе наноспутников с использованием бортовой навигационной аппаратуры ГНСС для определения параметров ГПЗ — спутникового гравиметра, космического градиентометра и бистатического радиовысотометра — значительно проще и дешевле в части изготовления, запуска и обслуживания.

Последние разработки наноспутников на основе технологий CubeSat свидетельствуют о перспективности этой космической технологии для решения различных целевых задач [8—10]. В настоящее время появилась даже возможность изготовления составных элементов наноспутников с помощью принтера объемной печати на борту МКС [11]. Запуск наноспутников выполняется с использованием специальной катапульты или транспортно-пускового контейнера [12], что позволяет сократить время ожидания запуска новых аппаратов и поддерживать их необходимое количество для глобального оперативного мониторинга изменения ГПЗ. Кроме того, использование наноспутников позволяет значительно снизить требования к станциям контроля, приема и обработки информации.

Спутниковый гравиметр. Основная идея функционирования спутникового гравиметра, представленная в работе [13], заключается в определении радиального ускорения наноспутника относительно КА навигационных систем ГЛОНАСС/GPS/Galileo (рис. 1). Этот параметр определяется путем измерения дальности и радиальной скорости наноспутника относительно КА ГНСС с использованием бортового приемника сигналов ГНСС. По определенным координатам наноспутника и известным координатам спутников ГНСС вычисляется проекция ускорения свободного падения наноспутника на линию „наноспутник — КА ГНСС“.

Так как движение КА на орбите подвержено влиянию не только изменений гравитационного поля Земли, но и таким негравитационным воздействиям, как сопротивление атмосферы, давление солнечного света и т.д., возникает необходимость в размещении на борту КА трехосного микроакселерометра. Согласно работе [14], минимальное значение негравитационных ускорений на высоте полета спутникового гравиметра составляет не более 10^{-9} м/с². Этому требованию удовлетворяет спутниковый микроакселерометр МкА-НД, разработанный в Институте физики Земли РАН (Москва) [15].

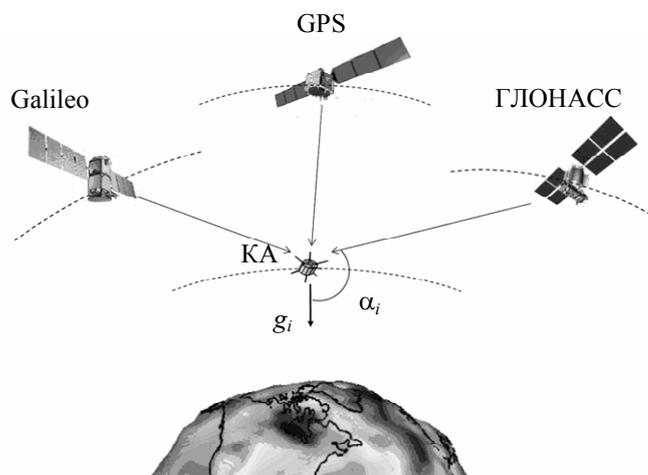


Рис. 1

Таким образом, минимальный состав измерительной бортовой аппаратуры наноспутника имеет следующий вид:

- многочастотный многосистемный приемник сигналов ГНСС;
 - антенна приема сигналов ГНСС, направленная в „зенит“;
 - акселерометр для учета негравитационных ускорений;
 - уголкоый отражатель для контрольных наземных лазерных дальномерных измерений.
- Среди основных преимуществ спутникового гравиметра следует выделить:
- глобальный охват Земли за короткий период времени;
 - непрерывную запись результатов измерений;
 - упрощенное изготовление и запуск аппарата;
 - низкую стоимость разработки.

Градиентометр по линии „спутник — спутник“. В основе космического градиентометра по линии „спутник — спутник“ лежит определение разности гравитационных сил, действующих на разнесенные по одной и той же орбите космические аппараты. В системе используются минимум два КА — эта идея реализована в проекте GRACE. Градиент ГПЗ определяется по измерению приращения текущего расстояния между низкоорбитальными космическими аппаратами. Для этого может быть использован фазовый радиодальномер, как в проекте GRACE, либо лазерный интерферометр, который планируется использовать в проекте GRACE-FO. Исходное уравнение движения системы „спутник — спутник“ в первом приближении имеет следующий вид:

$$\Delta \mathbf{r}'' = U_r'' \mathbf{r},$$

где $\Delta \mathbf{r}''$ — разность ускорений двух спутников, U_r'' — градиент гравитационного поля Земли по направлению r , \mathbf{r} — расстояние между КА.

В предлагаемом варианте космического градиентометра приращение межспутникового расстояния и относительной скорости вычисляется по результатам определения взаимного положения двух КА на основе измерений сигналов ГНСС бортовыми приемниками, размещенными на каждом КА. Это позволяет исключить необходимость в стабилизации аппаратов. Кроме того, погрешность определения параметров относительного движения слабо зависит от расстояния между КА [13, 16, 17]. В этом случае уравнение связи измеренных и определяемых величин будет представлено в следующем виде [18]:

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

где $\Delta X''$, $\Delta Y''$, $\Delta Z''$ — разность составляющих ускорений двух спутников; $U_{i,j}$ — составляющие полного тензора градиента ГПЗ; ΔX , ΔY , ΔZ — разность координат двух спутников.

Орбитальная группировка может быть представлена в виде двух аппаратов, находящихся на одной орбите, либо созвездия с включением нескольких пар КА на орбитах с другим наклоном (рис. 2). С увеличением количества аппаратов в созвездии уменьшается время накопления информации для глобального охвата Земли. Появляется возможность достижения цели, стоящей перед научным сообществом, — определение суточных вариаций ГПЗ. Кроме того, многоспутниковая система позволяет в равной степени определять как зональные, так и секторальные гармоники.

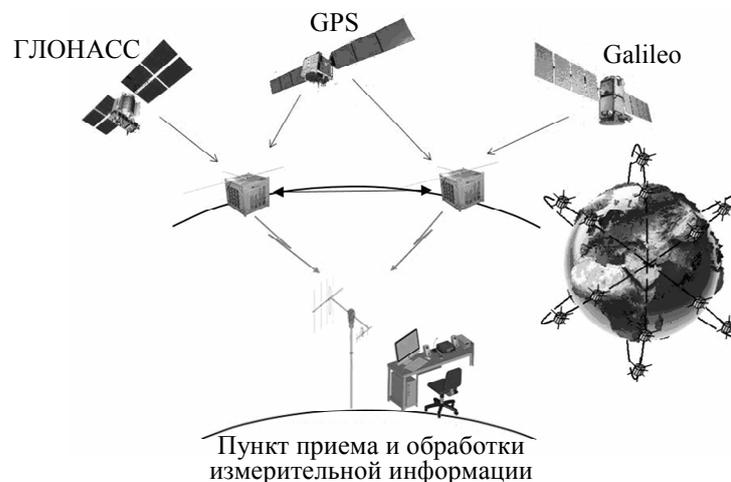


Рис. 2

Идея определения параметров ГПЗ с использованием бортового приемника сигналов ГНСС была впервые осуществлена в проекте CHAMP. За последние годы несколькими

научными институтами проведена совместная обработка навигационной измерительной информации с бортов спутников GRACE, SWARM, Sentinel-1A. Представленное мультиспутниковое решение в настоящее время используется для заполнения пробела между завершением проекта GRACE и запуском спутников GRACE-FO в 2018 г. Погрешность определения положения спутников составляет порядка 2—5 см.

На упомянутых КА размещен навигационный приемник BlackJack, который имеет существенные недостатки в части приема не более 16 сигналов только спутников GPS. При увеличении числа каналов приемника и включении в обработку сигналов навигационных систем ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo погрешность определения положения спутника на орбите может быть снижена. Существуют предпосылки для уменьшения погрешности определения орбиты спутника благодаря отсутствию многолучевости и тропосферы, а также существенному снижению влияния ионосферы. Реализация изложенного замысла требует создания специализированных алгоритмов обработки результатов измерений сигналов ГНСС высокоточными приемниками, размещенными на борту наноспутника.

Спутниковый радиовысотометр. Для измерения высоты поверхности и волнения океана может быть использована бистатическая система радиовысотометрии по сигналам ГНСС [19—22]. В настоящее время ГНСС-рефлектометрия (GNSS-reflectometry) — общепринятый термин для рефлектометрии, использующей в качестве передатчиков спутники ГНСС.

Принцип работы бистатической радиолокационной системы поясняется на рис. 3. В данной системе один приемник может одновременно наблюдать множество зеркально отраженных от поверхности океана сигналов (по количеству видимых спутников ГНСС). Прямые сигналы принимаются небольшой антенной, направленной в „зенит“, отраженные сигналы — антенной, направленной в „надир“. По взаимной временной задержке прямого и отраженного сигналов (разности путей распространения) и разности доплеровских смещений частоты отраженного и прямого сигналов можно определить высоту над отражающей поверхностью, а также скорость ее изменения и приращение текущей высоты.

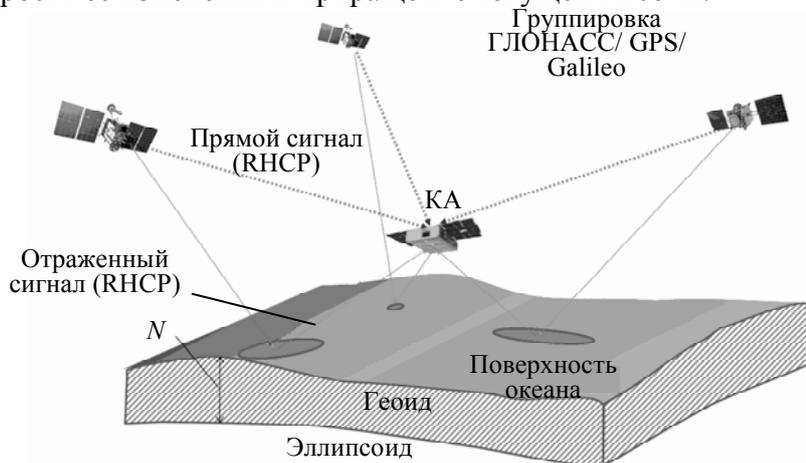


Рис. 3

В настоящее время в Российской Федерации проведен ряд экспериментов, по результатам которых выполнено научное обоснование метода бистатической ГНСС-радиовысотометрии [19—22].

Бистатическая система радиолокации с использованием сигналов ГНСС по сравнению с классическими монолокаторами космического базирования имеет следующие преимущества:

- отсутствие собственного излучения; по этой причине бортовая аппаратура имеет небольшой вес, а также малую потребляемую мощность;
- большое количество одновременно обрабатываемых измерений по отражающим зеркальным точкам на поверхности океана; количество зеркальных точек соответствует количеству видимых навигационных спутников и для четырех ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, Galileo,

Beidou) может достигать 20 и более; это обеспечивает высокую точность измерения высоты, характеристик волнения;

— более широкий спектр одновременно решаемых задач (измерение текущей высоты, определение характеристик взволнованной поверхности, построение радиоизображений и др.).

К недостаткам системы следует отнести невысокий уровень отраженного сигнала. Вместе с тем использование нескольких несущих частот сигналов ГНСС (до 3—5), а также постобработка по нескольким пролетам спутника позволяет в перспективе повысить энергетику радиолокатора для каждого конкретного навигационного спутника.

Во Всероссийском НИИ физико-технических и радиотехнических измерений были проведены эксперименты на основе двух методов измерения высоты по отраженным и прямым сигналам ГНСС. В первом случае использовались приемник Javad Quattro-G3D и две антенны: антенна, направленная в „зенит“ (Javad CrAnt), и антенна с левой круговой поляризацией, направленная в „надир“ (рис. 4). Приемная аппаратура размещалась на высоте 6-го этажа технического здания. На рис. 5 представлены результаты измерения высоты до отражающей поверхности по кодовому навигационному сигналу GPS. Погрешность определения высоты антенны (h) относительно поверхности Земли составила порядка 30 см при номинальной высоте 22,8 м. При использовании фазовых измерений возможно обеспечение сантиметровой точности.

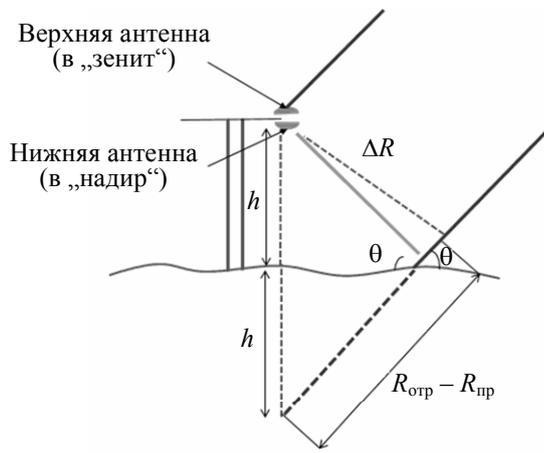


Рис. 4

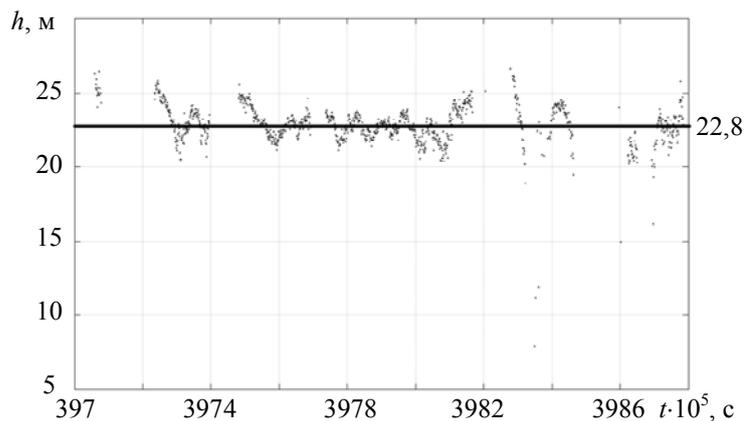


Рис. 5

Высоту размещения приемной системы приблизительно можно оценить выражением

$$h = \frac{R_{\text{пр}} - R_{\text{отр}}}{2 \sin \theta},$$

где $R_{\text{пр}} - R_{\text{отр}}$ — разность путей распространения прямого и отраженного сигналов соответственно; θ — угол прихода сигнала (или угол возвышения спутника ГНСС).

Второй метод называется интерференционным и реализуется с помощью одной антенны и одного приемника. При этом исследуется изменение отношения сигнал/шум (SNR) принимаемого сигнала (прямой + отраженный) в зависимости от угла возвышения спутника, т.е. от времени. Прямые и отраженные сигналы принимаются одной антенной. Вследствие изменения разности фаз во времени сигнал/шум осциллирует с частотой, пропорциональной высоте расположения антенны над поверхностью и скорости изменения угла θ :

$$\varphi(t) = \frac{2\pi\Delta R}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} h \cos(\theta(t)),$$

где $\varphi(t)$ — фаза принимаемого сигнала, ΔR — разность хода двух сигналов, λ — длина волны сигнала.

По значениям углов θ определяется высота

$$h = \frac{\lambda\pi}{4\sin(\Delta\theta/2)\sin(\theta(t_0) + \Delta\theta/2)},$$

где $\Delta\theta/2$ — изменение угла возвышения спутника ГНСС, при котором разность фаз изменится на 2π .

Результаты теоретических расчетов зависимости амплитуды принятого навигационного сигнала от угла θ при различных значениях h приведены на рис. 6, а. Отражающие объекты на подстилающей поверхности имеют различные высоты и различные отражающие свойства, поэтому экспериментальные данные не повторяют полностью теоретическую кривую (рис. 6, б).

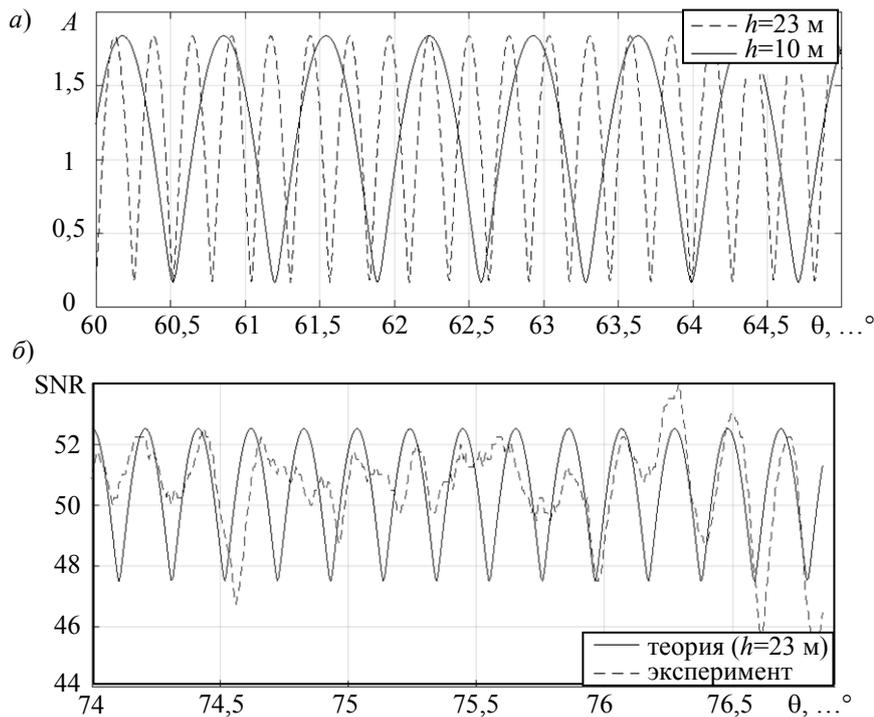


Рис. 6

Заключение. Представленные в статье конфигурации систем космических гравиметрических спутников на базе наноспутников имеют следующие преимущества:

- возможно использование унифицированного ряда наноспутников типа CubeSat;
- возможно изготовление составных элементов наноспутников и их запуск с борта МКС;
- требуемый состав бортовой аппаратуры минимален.

Развертывание на орбите группы наноспутников обеспечивает возможность мониторинга геофизических параметров Земли в режиме реального времени, что позволяет предупреждать землетрясения, цунами и т.д.

Наноспутник с бистатическим радиовысотометром на основе сигналов ГНСС позволяет получить намного больше измерительной информации, чем спутник, реализующий метод традиционной активной радиовысотометрии. Избыточность измерений, которую обеспечивает бистатический радиовысотометр, является необходимой для решения всех перечисленных задач.

Бистатический радиовысотометр и космический гравиметр или градиентометр могут быть совмещены в рамках одного многофункционального наноспутника путем использования многоантенного приемника ГНСС, что позволит одновременно определять различные параметры ГПЗ. Эта задача требует разработки и изготовления многоантенного высокоточного бортового космического приемника сигналов ГНСС, а также более совершенного алгоритма обработки результатов измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reigber C., Schwintzer P., Lühr H. The CHAMP geopotential mission // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 1999. Vol. 40. P. 285—289.
2. Tapley B., Bettadpur S., Watkins M., Reigber C. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31. DOI: 10.1029/2004GL019920.
3. ESA. Gravity field and steady-state ocean circulation mission // Report for Mission Selection of the Four Candidate Earth Explorer Missions ESA SP-1233(1). European Space Agency, 1999.
4. Ni S., Chen J., Li J., Wang S. Water storage changes and climate variability in the Mekong river basin // 26th IUGG General Assembly: Abstract. 2015. IUGG-0466.
5. Ran J., Ditmar P., Klees R., Vizcaino M. Advanced analysis of mass balance of the Greenland Ice Sheet from GRACE and surface mass balance modelling // 26th IUGG General Assembly: Abstract. 2015. IUGG-4495.
6. Han S-C., Sauber J., Luthcke S., Ji C., Pollitz F. Implications of postseismic gravity change following the great 2004 Sumatra-Andaman earthquake from the regional harmonic analysis of GRACE intersatellite tracking data // *J. Geophys. Res.* 2008. N 113. (B11413). DOI: 10.1029/2008JB005705.
7. Heki I.K., Tanaka I.Y., Matsuo K., Shestakov N. First detection of coseismic gravity change of a deep-focus earthquake by satellite gravimetry: The 2013 Okhotsk Sea earthquake (M8.3) // 26th IUGG General Assembly: Abstract. 2015. IUGG-1189.
8. Романов А. А., Селиванов А. С., Тюлин А. Е. Перспективы разработки малоразмерных космических аппаратов различного целевого назначения АО „Российские космические системы“ // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59, № 6. С. 415—422.
9. Ключников В. Ю., Клементьев С. А. Наноспутники — наиболее перспективный класс космических аппаратов // *Иноватика и экспертиза*. 2016. Вып. 2 (17). С. 97—105.
10. Чернышов А. А., Чугунин Д. В., Могилевский М. М., Моисеенко И. Л., Костров А. В., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Янин Д. В. Изучение неоднородной структуры ионосферы при помощи одновременных измерений наноспутниками стандарта CubeSat // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59, № 6. С. 443—449.
11. <http://www.sputnix.ru/ru/analytics/item/383-o-vozmozhnosti-zapuska-sputnikov-s-mks>.
12. Зарецкий Д. С. и др. Транспортно-пусковой контейнер для 218 наноспутников типоразмера 3u, 3u+ // *Материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. „Актуальные проблемы ракетно-космической техники“ (IV Козловские чтения)*. Самара, 2015.
13. Фатеев В. Ф. Космические измерители параметров гравитационного поля // *Альманах современной метрологии*. 2015. № 3. С. 32—62.
14. Микрин Е. А. и др. Высокоточный прогноз орбит космических аппаратов, анализ влияния различных возмущающих факторов на движение низкоорбитальных и высокоорбитальных КА // XXI Санкт-Петербургская Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам: Сб. материалов. 2016. С. 77—88.

15. Дубовской В. Б. и др. Разработки высокоточных космических и наземных акселерометрических и гравиметрических приборов // Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение: Докл. науч.-техн. конф., 14 — 15 февр. 2017, Менделеево. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2017. 360 с.
16. Давлатов Р. А. Оценка влияния погрешности межспутниковых измерений на точность определения характеристик гравитационного поля // Тр. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и специалистов „Метрология в XXI веке“. Менделеево, 2015.
17. Фатеев В. Ф., Давлатов Р. А. Измеритель параметров ГПЗ по линии „спутник — спутник“ на основе навигационной аппаратуры потребителя // Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение: Докл. науч.-техн. конф., 14—15 февр. 2017, Менделеево. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2017. 360 с.
18. Яшкин С. Н., Лонский И. И. Уравнения поправок измеренных величин в системе „спутник — спутник“ // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2003. № 4. С. 31—38.
19. Фатеев В. Ф., Сахно И. В. Особенности построения авиационно-космических двухпозиционных РСА с монохроматическим зондирующим сигналом: Сб. трудов. СПб: МО РФ, 2004.
20. 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. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 4. С. 34—39.
21. 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 бистатический радиолокационный комплекс // Радиотехника, электромагнитные волны и электронные системы. 2012. Т. 17, № 5.
22. Фатеев В. Ф., Лопатин В. П., Кузьмин Н. И. Космический эксперимент по радиолокации с использованием сигналов ГНСС на борту МКС // Метрология времени и пространства: Материалы VIII Междунар. симп. Менделеево, 2016.

Сведения об авторах

- Вячеслав Филиппович Фатеев** — д-р техн. наук, профессор; Всероссийский НИИ физико-технических и радиотехнических измерений; начальник НТЦ-82;
E-mail: fateev@vniiftri.ru
- Руслан Аскарджонович Давлатов** — Всероссийский НИИ физико-технических и радиотехнических измерений; мл. научный сотрудник; E-mail: davlatov_r_a@mail.ru
- Владислав Павлович Лопатин** — Всероссийский НИИ физико-технических и радиотехнических измерений; инженер; E-mail: lopatin@vniiftri.ru

Поступила в редакцию
14.02.18 г.

Ссылка для цитирования: Фатеев В. Ф., Давлатов Р. А., Лопатин В. П. Применение навигационной аппаратуры ГНСС на борту наноспутника // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 5. С. 437—445.

APPLICATION OF THE GNSS NAVIGATION APPARATUS ON BOARD A NANOSATELLITE

V. F. Fateev, R. A. Davlatov, V. P. Lopatin

All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radio-Technical Measurements,
141570, Mendeleevo, Moscow region, Russia
E-mail: fateev@vniiftri.ru

Possibilities of the use of a nanosatellite with on-board receiver of global navigational satellite systems for determination of parameters of the Earth gravitational field are discussed. Configurations of space measuring instruments on the base of nanosatellites under consideration include space gravimeter, space gradient meter along the line “satellite — satellite”, and bi-static radio altimeter.

Keywords: small spacecraft, nanosatellite, global navigation satellite systems, parameters of the gravitational field of the Earth, space gravimeter, space gradient meter

Data on authors

- Vyacheslav F. Fateev** — Dr. Sci., Professor; All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radio-Technical Measurements; Head of the STC-82; E-mail: fateev@vniiftri.ru
- Ruslan A. Davlatov** — All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radio-Technical Measurements; Junior Scientist; E-mail: davlatov_r_a@mail.ru
- Vladislav P. Lopatin** — All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radio-Technical Measurements; Engineer; E-mail: lopatin@vniiftri.ru

For citation: Fateev V. F., Davlatov R. A., Lopatin V. P. Application of the GNSS navigation apparatus on board a nanosatellite. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 5. P. 437—445 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-437-445