

## МНОГОСПУТНИКОВЫЙ КЛАСТЕР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

В. Ф. ФАТЕЕВ, Р. А. ДАВЛАТОВ

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

Рассматриваются возможности использования кластера малоразмерных космических аппаратов для детектирования параметров гравитационного поля Земли на основе использования бортовых приемников глобальных спутниковых навигационных сигналов.

**Ключевые слова:** малоразмерный космический аппарат, параметры гравитационного поля Земли, космический гравиметр, космический градиентометр

**Структура многоспутникового кластера.** Уточнение параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ) — одна из основных задач при создании фундаментального геодезического обеспечения. Эффективным средством для решения указанной задачи является использование специальных геодезических спутников, на борту которых размещаются космические гравитационные градиентометры для определения второго градиента потенциала ГПЗ. Однако реализованные высокотехнологичные зарубежные проекты (CHAMP, GRACE, GOCE) представляют собой весьма дорогостоящие измерительные системы.

Согласно исследованиям ведущих зарубежных институтов, увеличение количества аппаратов в градиентометрических системах по линии „спутник — спутник“ является более эффективным способом уточнения модели ГПЗ, нежели уменьшение погрешности бортового измерителя межспутниковых расстояний. В настоящее время в системе используется лишь одна пара космических аппаратов (КА). Одним из первых, кто рассмотрел возможность использования системы, состоящей из нескольких чувствительных масс, является Джон Синг, предложивший для измерения кривизны гравитационного поля использовать детектор в виде двойного тетраэдра [1]. Уже тогда, в 1958 г., до изобретения лазеров, он предположил, что параметры относительного движения чувствительных масс следует определять „оптическим измерителем“.

В настоящее время выполняются работы по проекту GRACE 2, который должен стать многоспутниковой системой, состоящей из нескольких КА (не менее трех) [2, 3]. Изменение межспутникового расстояния предполагается детектировать с использованием бортового лазерного интерферометра, который тестируется в проекте GRACE-FO [4]. Однако ключевым вопросом таких систем является осуществление измерений между КА, расположенными на соседних орбитах. Для решения этой задачи существенно усложняется бортовая аппаратура и накладываются ограничения на орбиты КА.

Параметры относительного движения КА космической градиентометрической системы могут быть определены на основе бортовой навигационной аппаратуры потребителей (НАП) сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). В настоящей статье рассматриваются возможности использования кластера из нескольких малоразмерных космических аппаратов (МКА) с близкими орбитами. Преимуществами рассматриваемой системы являются:

- невысокая стоимость, что определяется минимальным составом бортовой измерительной аппаратуры каждого МКА;
- глобальный охват при измерениях параметров ГПЗ;

- отсутствие необходимости ориентации КА для осуществления межспутниковых измерений;
- многократное увеличение данных измерений (до 10 раз) за счет использования пар „МКА — МКА“.

Кластер имеет форму октаэдра. Структура представлена на рис. 1, цифрами указано количество чувствительных осей. В состав аппаратуры каждого МКА входит навигационная аппаратура потребителя и бортовой микроакселерометр для учета негравитационных ускорений, оказывающих влияние на МКА.

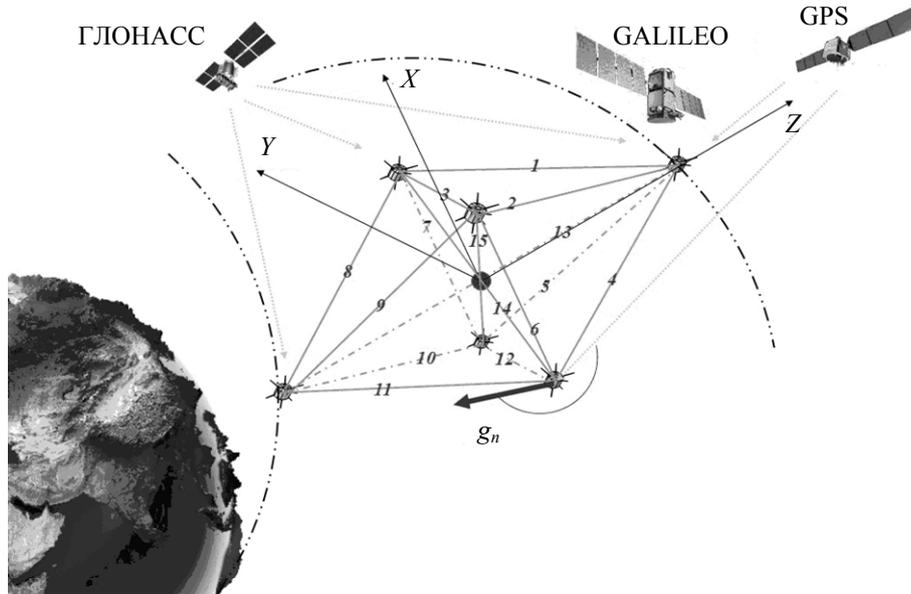


Рис. 1

**Спутниковый гравиметр.** Бортовая НАП каждого МКА позволяет определять их взаимное пространственное положение, скорость и ускорение между спутником в составе кластера и спутниками навигационных систем. Это позволяет определить ускорение свободного падения каждого МКА на линии „кластер — спутниковый гравиметр“ [5, 6].

Рассмотрим случай приема навигационного сигнала ГНСС типа ГЛОНАСС на борту геодезического КА (рис. 2). Согласно рисунку для радиального ускорения геодезического КА относительно КА ГНСС можно записать:

$$\ddot{R} = g_{КА} \cos \alpha - g_{ГНСС} \cos \beta + a_{атм} \sin \alpha + a_{\Sigma}, \quad (1)$$

где  $g_{КА}$ ,  $g_{ГНСС}$  — гравитационные ускорения КА и КА ГНСС;  $\alpha$ ,  $\beta$ , — углы между линией „спутник — спутник“ и вертикалью для КА и КА ГНСС;  $a_{атм}$  — активное ускорение геодезического КА, вызванное сопротивлением атмосферы;  $a_{\Sigma}$  — сумма других активных малых ускорений КА (давление Солнца, альbedo Земли и др.).

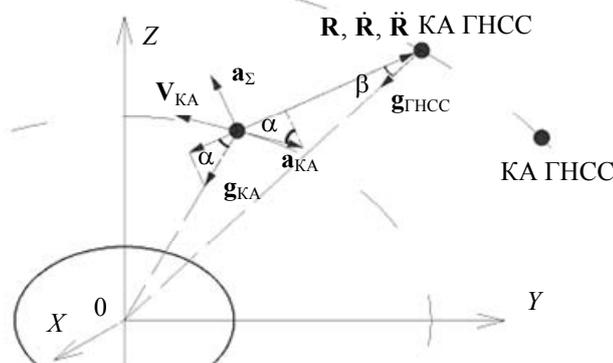


Рис. 2

Из формулы (1) находим искомое текущее гравитационное ускорение геодезического КА вдоль его орбиты:

$$g_{\text{КА}} = \frac{1}{\cos \alpha} (\ddot{R} + g_{\text{ГНСС}} \cos \beta - a_{\text{атм}} \sin \alpha - a_{\Sigma}). \quad (2)$$

Таким образом, текущее ускорение свободного падения геодезического КА можно определить по результатам измерения радиального ускорения КА в навигационном канале КА — ГНСС, результатам бортовых измерений активного ускорения КА, вызванного сопротивлением атмосферы, давлением Солнца и другим параметрам, а также по результатам вычисления гравитационного ускорения и угла по эфемеридам КА ГНСС.

Связь между погрешностями определения ускорения свободного падения (УСП) и измерения радиального ускорения в первом приближении определяется формулой

$$\delta g_{\text{КА}} = \delta \ddot{R}. \quad (3)$$

При реализуемой точности измерения радиального ускорения ошибка измерений УСП в космической измерительной радиолинии „низкий КА — высокий КА ГНСС“ в первом приближении составляет единицы миллигал.

Погрешности вычисления гравитационного ускорения КА ГНСС  $g_{\text{ГНСС}}$  и углов  $\alpha$  и  $\beta$  незначительны, поскольку координаты геодезического КА и навигационного КА известны с весьма малой погрешностью (меньше 1 м).

Для измерения негравитационных ускорений, действующих на МКА, необходим бортовой микроакселерометр. Погрешность измерения не должна превышать  $10^{-9}$  м/с<sup>2</sup>. Этому требованию удовлетворяет спутниковый микроакселерометр МКА-НД, разработанный в Институте физики Земли РАН (Москва) [7]. В случае отсутствия бортового микроакселерометра негравитационные ускорения могут быть определены путем включения их в состав неизвестных при обработке результатов измерений.

Следует отметить, что точность определения искомого ускорения свободного падения геодезического КА по формуле (2) тем выше, чем меньше угол  $\alpha$ , т.е. для измерений необходимо выбирать спутники, расположенные вблизи зенита. Такая возможность на борту КА всегда имеется, особенно при использовании многосистемного приемника сигналов ГНСС, работающего одновременно по сигналам ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BaiDou.

Кроме того, при уменьшении угла  $\alpha$  между линией „спутник — спутник“ и местной вертикалью, как следует из формулы (2), влияние на измерение активного ускорения, вызванного сопротивлением атмосферы, существенно уменьшается, а в зените исчезает совсем. При выполнении измерений возможно определение проекций бортового значения УСП относительно 6—10 околозенитных спутников одновременно.

**Гравитационный градиентометр.** Бортовая НАП позволяет определить параметры относительного движения между спутниками внутри кластера, что, в свою очередь, позволяет произвести расчет составляющих тензора второго градиента потенциала ГПЗ относительно направления „спутник — спутник“ [5, 6].

Связь изменения взаимного гравитационного ускорения двух КА с установленной на борту НАП и составляющих второго градиента потенциала ГПЗ описывается в первом приближении следующим выражением [8]:

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

где  $\Delta X'', \Delta Y'', \Delta Z''$  — разности ускорений двух КА по соответствующим координатным осям;  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  — разности координат двух КА по соответствующим координатным осям;  $U_{n,m}$  — составляющие гравитационного градиента.

При увеличении количества спутников до трех появляется возможность однозначно определить все составляющие тензора гравитационного градиентометра в каждый момент времени, так как количество чувствительных осей увеличивается до трех, что приводит к формированию системы из 9 уравнений с 6 неизвестными. Для уменьшения влияния погрешности определения координат спутников при расчете составляющих градиента следует располагать спутники по взаимно ортогональным осям.

В этом случае вариант кластера состоит из трех пар спутников: одна пара располагается по местной вертикали, вторая — по направлению движения, третья дополняет систему до правой. Спутники первой и третьей пары через полвитка меняются местами в процессе полета, МКА второй пары всегда движутся „след-в-след“ друг за другом (рис. 3).

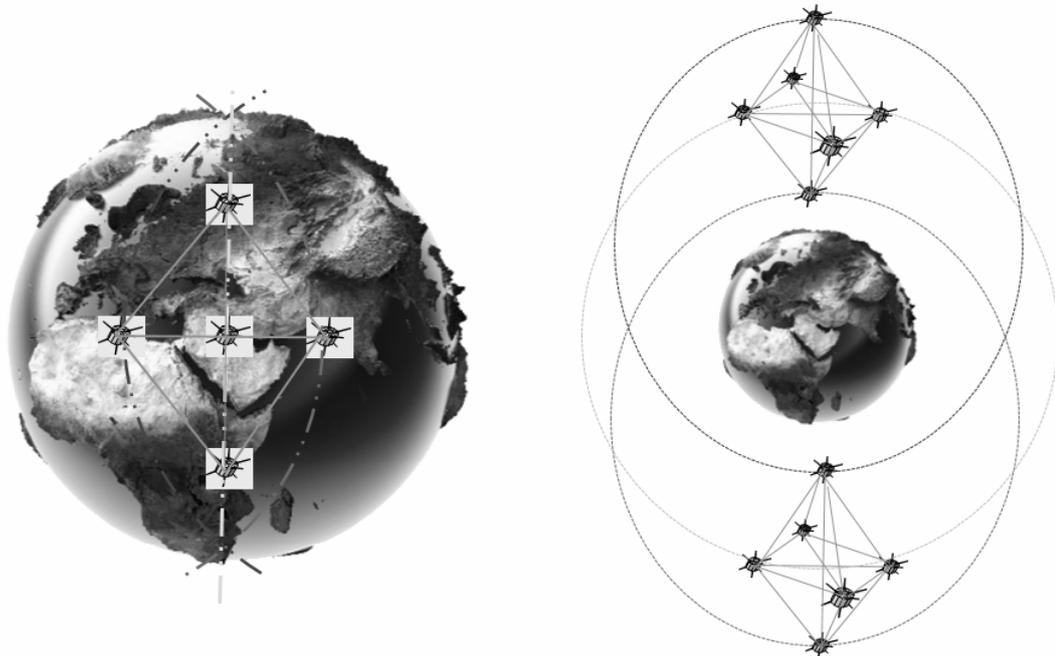


Рис. 3

Одним из ключевых параметров системы является межспутниковое расстояние ( $S$ ). Этот параметр, помимо погрешности определения параметров относительного движения, напрямую определяет чувствительность системы ( $G$ ) и точность решения ( $\Delta$ ). На рис. 4, а, б представлены зависимости этих параметров от межспутникового расстояния. В качестве начальных условий принимались следующие параметры: высота полета 500 км, время накопления сигнала 10 с, погрешность определения орбиты КА 0,005 м. Относительные погрешности измерения расстояния и определения градиента связаны соотношением [5]

$$\frac{\delta R}{\Delta R_W} = \frac{\delta W_{xx}}{W_{xx}},$$

где  $\delta R$  — погрешность измерения межспутникового расстояния,  $\Delta R_W$  — изменение расстояния между спутниками,  $\delta W_{xx}$  — погрешность определения второго градиента ГПЗ по линии  $xx$ .

Таким образом, оптимальным вариантом при выборе межспутникового расстояния является величина порядка 150 км, что позволит определить составляющие градиента ГПЗ на уровне 0,5 этвеш ( $1 \text{ э} = 10^{-9} \text{ с}^{-2}$ ). Для повышения точности необходим большой набор данных

и их статистическая обработка. При количестве измерений более  $10^4$  на нескольких витках ожидаемое повышение точности составит около 100 раз.

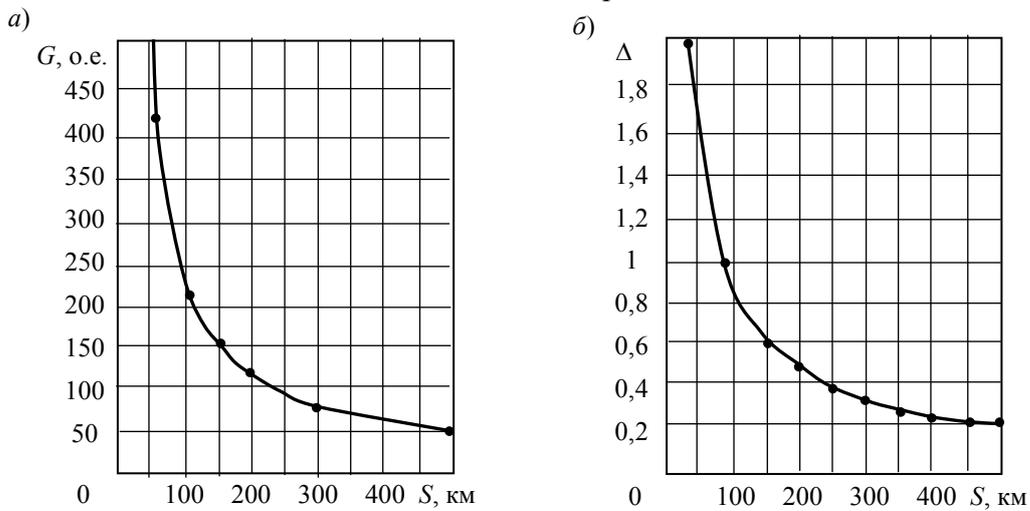


Рис. 4

**Измеритель третьего градиента.** При изменении методики обработки измерений многоспутниковый кластер можно использовать как измеритель третьего градиента потенциала ГПЗ. Пусть с помощью бортовой НАП определены составляющие ускорения свободного падения по оси  $Z$  каждого спутника. Так как положение каждого спутника известно, то появляется возможность определить значение  $g_{z0}$  по  $g_{z1}, g_{z2}, g_{z3}, g_{z4}$ . Таким образом, имеются три точки пространства с определенным значением составляющей УСП  $g_z$ :  $g_{z5}, g_{z0}, g_{z6}$ . Это позволяет вычислить значение третьего градиента ГПЗ по оси  $Z$ :

$$W_{ZZZ} = \frac{\frac{g_{z0} - g_{z5}}{S_{0-5}} - \frac{g_{z6} - g_{z0}}{S_{0-6}}}{S_{0-5} + S_{0-6}},$$

при одинаковых расстояниях между спутниками  $S_{0-5} = S_{0-6}$  получим выражение для одной из составляющих тензора третьих градиентов:

$$W_{ZZZ} = \frac{2g_{z0} - g_{z5} - g_{z6}}{S^2}.$$

Тензор градиента третьего порядка геопотенциала состоит из 27 составляющих, но только 10 из них являются независимыми из-за непрерывности гравитационного поля Земли.

Одно из главных преимуществ использования третьего градиента ГПЗ заключается в том, что он более чувствителен к локальным аномалиям и лучше описывает высокочастотную часть модели ГПЗ [9].

**Заключение.** Многоспутниковый кластер с бортовой НАП является многофункциональным измерительным средством, позволяющим на основе приема сигналов ГНСС определить ускорение свободного падения, второй и третий градиенты ГПЗ.

Основные преимущества системы:

- низкая стоимость изготовления;
- большой объем информации;
- использование метрологических возможностей ГНСС, в том числе ГЛОНАСС;
- наличие задела в разработке основных измерительных средств системы;
- отсутствие технических ограничений при формировании кластеров МКА.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синг Дж. Л. Общая теория относительности. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
2. Elsaka B., Raimondo J., Brieden P., Reubelt T., Kusche J., Flechtner F., Iran S., Sneeuw N., Müller J. Comparing seven candidate mission configurations for temporal gravity field retrieval through full-scale numerical simulation // *J. of Geophysical Research*. 2014. Vol. 88, iss. 1. P. 31—43.
3. Elsaka B. Feasible multiple satellite mission scenarios flying in a constellation for refinement of the gravity field recovery // *Intern. Journal of Geosciences*. 2014. N 5(3). P. 267—273.
4. Sheard B. S., Heinzel G., Danzmann K., Shaddock D. A., Klipstein W. M., Folkner W. M. Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission // *J. of Geophysical Research*. 2012. Vol. 86. P. 1083—1095.
5. Фатеев В. Ф. Космические измерители параметров гравитационного поля // Альманах современной метрологии. 2015. № 3. С. 32—62.
6. 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.
7. Пшеничник В. Г., Дубовской В. Б., Леонтьев В. И. Разработки высокоточных космических и наземных акселерометрических и гравитационных приборов // *Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение: Докл. науч.-техн. конф., 14—15 февр. 2017, Менделеево. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2017.*
8. Яшкин С. Н., Лонский И. И. Уравнения поправок измеренных величин в системе „спутник — спутник“ // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2003. № 4. С. 31—38.
9. Moritz H. *Kinematical Geodesy* / Rep. N 92, Dep. of Geodetic Science, Ohio State University. Columbus, OH, USA, 1967.

## 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

Поступила в редакцию  
07.12.18 г.

Ссылка для цитирования: Фатеев В. Ф., Давлатов Р. А. Многоспутниковый кластер для определения параметров гравитационного поля Земли // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2019. Т. 62, № 5. С. 470—476.

MULTI-SATELLITE CLUSTER  
TO DEFINE PARAMETERS OF THE GRAVITATIONAL FIELD OF THE EARTH

V. F. Fateev, R. A. Davlatov

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

Possible application of a cluster of small-sized spacecraft to detect parameters of the Earth's gravitational field is considered. The analyzed approach is based on the use of onboard receivers of Global Satellite Navigation Signals.

**Keywords:** small-sized spacecraft, the parameters of the Earth's gravitational field, space gravimeter, space gradiometer

## REFERENCES

1. Synge J.L. *Relativity – the General Theory*, North-Holland, 1960.
2. Elsaka B., Raimondo J., Brieden P., Reubelt T., Kusche J., Flechtner F., Iran S., Sneeuw N., Müller J. *J. of Geophysical Research*, 2014, no. 1(88), pp. 31—43.
3. Elsaka B. *Intern. Journal of Geosciences*, 2014, no. 5(3), pp. 267—273.
4. Sheard B.S., Heinzel G., Danzmann K., Shaddock D.A., Klipstein W.M., Folkner W.M. *J. of*

- Geophysical Research*, 2012, vol. 86, pp. 1083–1095.
5. Fateev V.F. *Al'manakh sovremennoy metrologii* (Almanac of Modern Metrology), 2015, no. 3, pp. 32–62. (in Russ.)
  6. Fateev V.F., Davlatov R.A., Lopatin V.P. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 5(61), pp. 437–445. (in Russ.)
  7. Pshenyaniuk V.G., Dubovskoy V.B., Leont'yev V.I. *Navigatsiya po gravitatsionnomu polyu Zemli i ee metrologicheskoe obespechenie* (Navigation on Gravitational Field of Earth and Its Metrological Support), Proceedings of the Scientific and Technical Conference, Mendeleevo, Federal State Unitary Enterprise Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radioengineering, 14–15 February 2017.
  8. Yashkin S.N., Lonskiy I.I. *Proceedings of the Higher Educational Institutions. Izvestia vuzov "Geodesy and aerophotosurveying"*, 2003, no. 4, pp. 31–38. (in Russ.)
  9. Moritz H. *Kinematical Geodesy* / Rep. N 92, Dep. of Geodetic Science, Ohio State University. Columbus, OH, USA, 1967.

**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

**For citation:** Fateev V. F., Davlatov R. A. Multi-satellite cluster to define parameters of the gravitational field of the Earth. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 5. P. 470—476 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-5-470-476