

УДК 528:629.78; 519.654

МОДЕЛЬ ОДНОМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

© 2021 г. А.А. Голован¹, М.Н. Дробышев²

¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

² *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

Автор для переписки: М.Н. Дробышев (e-mail: drmika88@gmail.com)

Проведение аэрогравиметрических измерений в труднодоступных районах Земли предполагает высокоточное определение координат самолета-лаборатории или другого носителя гравиметрического оборудования. В этих целях используются приемники сигналов спутниковых навигационных систем. При решении задач, требующих получения точной информации об изменении вертикального положения объекта, предлагается применять алгоритмические решения, основанные на редуцированных моделях задач обработки первичных спутниковых измерений. Первичные спутниковые измерения регистрируются параллельно с гравиметрическими наблюдениями во время выполнения съемок, после чего осуществляется совместная камеральная обработка, качество результатов которой напрямую зависит от точности определения высоты полета на маршруте. Представлен соответствующий алгоритм обработки, позволяющий получить оценки значений высоты и вертикальной скорости с повышенной относительно стандартных алгоритмов точностью за счет использования известных плановых координат. Проведены сеансы спутниковых измерений на неподвижном основании и сравнительный анализ результатов расчетов, полученных по предлагаемому и традиционному алгоритмам. Измерения выполнялись с частотой 1 Гц и продолжительностью от 8 до 10 ч. Качество полученных результатов расчетов определяли оценкой среднеквадратического отклонения высоты, которое демонстрирует снижение амплитуды разброса мгновенных значений до 18 % при применении модели одномерной обработки относительно трехмерного решения. Представленная модель одномерной обработки первичных спутниковых измерений для определения высоты и вертикальной скорости показала себя актуальным и работоспособным алгоритмом, потенциальное развитие которого в перспективе позволит повысить точность решения задач скалярной гравиметрии, при проведении наблюдений с использованием подвижных носителей, а, следовательно, повысить точность аэрогравиметрических работ.

Ключевые слова: одномерный алгоритм, навигация, спутниковые системы, первичная обработка спутниковых измерений, *GPS* измерения, двухчастотный приемник, аэрогравиметрия.

Введение

Однозначное определение вертикального положения точки наблюдений необходимо при решении ряда задач. К ним относятся: наземная, морская и аэрогравиметрия, определение пространственной ориентации лазерных систем наблюдения за космическими объектами, оценка положения антенн фазированных антенных решеток, оценка смещения антенн радиотехнических дальномерных систем, геодезическое сопровождение при строительстве и обслуживании крупных инженерных сооружений и т.д.

Геодезические задачи решаются с помощью регулярных наземных, дистанционных (аэрокосмических) и инструментальных наблюдений в рамках геодинамического мониторинга. Для задач гравиметрии, при проведении наблюдений с использованием подвижных носителей – научных судов и авиалабораторий, а также космических аппаратов, такое решение неприменимо [Дробышев и др., 2006, 2011; Forsberg, Skourup, 2005].

В настоящее время для определения координат подвижного носителя в морской и аэрогравиметрии используются системы спутникового позиционирования с различными методами обработки первичных измерений. Указанные системы также применяются при наземных гравиметрических измерениях, где местоположение в основном изменяется по высоте [Илюхин, Конешов, 2014а,б, 2018]. Наибольший интерес для гравиметрии представляет изменение вертикального положения носителя.

Предлагаемая модель обработки первичных спутниковых измерений позволяет повысить точность определения высоты и вертикальной скорости за счет известных плановых координат, при разных режимах измерений, в том числе дифференциального и, так называемого, режима *Precise Point Positioning (PPP)*.

Модель одномерной обработки

Принципиальное отличие представляемой модели обработки первичных измерений глобальных навигационных спутниковых систем от существующих заключается в использовании измерений, предназначенных для решения трехмерной задачи позиционирования – определении широты, долготы и высоты при решении задачи позиционирования только для одного навигационного параметра – высоты. Модель задачи предполагает известными плановые координаты, а основное движение происходит вдоль вертикальной оси. Применение известных плановых координат редуцирует число оцениваемых параметров, что повышает точность позиционирования по вертикальной компоненте. В данной работе рассматриваются измерения на неподвижном основании, т.е. плановые координаты не меняются.

Далее описываются базовые модели используемых алгоритмов обработки первичных кодовых измерений – кодовых псевдодальностей [Leick, Rapoport, Tatarnikov, 2015]. Получение позиционных и скоростных решений по доплеровским псевдоскоростям и фазовым измерениям проводится по аналогичным алгоритмам [Вавилова и др., 2009]. Измеренное значение для каждого i -го из видимых N спутников можно представить в виде суммы истинного расстояния приемник–спутник $\rho^{(i)}$, выраженной в метрах погрешности часов приемника $\rho_{\Delta t}$ и остаточной погрешности кодовых измерений $\Delta\rho^{S(i)}$ (индекс спутника i здесь и далее указывается в скобках):

$$\tilde{Z}_p^{(i)} = \rho^{(i)} + \rho_{\Delta t} + \Delta\rho^{S(i)}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Искомым неизвестным слагаемым является истинное расстояние приемник–спутник, которое определяется как модуль векторной разности гринвичских координат спутника $\eta^{sat(i)} = (\eta_1^{sat(i)}, \eta_2^{sat(i)}, \eta_3^{sat(i)})^T$ и истинных гринвичских координат приемника $\eta = (\eta_1, \eta_2, \eta_3)^T$:

$$\rho^{(i)} = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (\eta_j^{sat(i)} - \eta_j)^T (\eta_j^{sat(i)} - \eta_j)} = \sqrt{(\eta^{sat(i)} - \eta)^T (\eta^{sat(i)} - \eta)}. \quad (2)$$

Для определения трех неизвестных составляющих вектора-столбца истинных гринвичских координат приемника η_1, η_2, η_3 , и погрешности часов приемника $\rho_{\Delta t}$ на основе модели, описанной выражениями (1) и (2), необходимо иметь невырожденную систему по крайней мере из четырех измерений. Представив вектор-столбец истинных гринвичских координат приемника как сумму априори известных координат приемника η' и искомой погрешности априорной информации $\eta = \eta' + \Delta\eta$, истинное расстояние приемник–спутник можно записать в виде следующего выражения:

$$\rho^{(i)} = \sqrt{(\eta^{sat(i)} - \eta)^T (\eta^{sat(i)} - \eta)} \cong \sqrt{\rho_{comp}^{(i)2} - 2(\eta^{sat(i)} - \eta')^T \Delta\eta} = \rho_{comp}^{(i)} - \frac{(\eta^{sat(i)} - \eta')^T \Delta\eta}{\rho_{comp}^{(i)}}, \quad (3)$$

где $\rho_{comp}^{(i)} = \sqrt{(\eta^{sat(i)} - \eta')^T (\eta^{sat(i)} - \eta')}$ – вычисленная дальность приемник–спутник.

Затем из измеренного значения вычитается вычисленное расстояние приемник–спутник, в результате чего получаются измерения $z_p^{(i)}$ “в малом”:

$$z_p^{(i)} = \tilde{Z}_p^{(i)} - \rho_{comp}^{(i)} \cong h^{T(i)} x + \Delta\rho^{S(i)}, \quad (4)$$

в которых $h^{T(i)} = \left(\frac{(\eta_1^{sat(i)} - \eta'_1)}{\rho_{comp}^{(i)}}, \frac{(\eta_2^{sat(i)} - \eta'_2)}{\rho_{comp}^{(i)}}, \frac{(\eta_3^{sat(i)} - \eta'_3)}{\rho_{comp}^{(i)}}, 1 \right)$ – вектор-строка;

$x = (\Delta\eta_1, \Delta\eta_2, \Delta\eta_3, \rho_{\Delta\tau})^T$ – вектор оцениваемых параметров.

Далее формализуется задача оценивания вида

$$z = Hx + r, \quad z = (z^{(1)}, z^{(2)}, \dots, z^{(N)})^T, \quad H = (h^{T(1)}, h^{T(2)}, \dots, h^{T(N)}), \quad (5)$$

$$r = (\Delta\rho^{S(1)}, \Delta\rho^{S(2)}, \dots, \Delta\rho^{S(N)})^T.$$

В дальнейшем решении рекомендуется использовать первые разности, т.е. разность измерений каждого спутника и опорного (зенитного, с максимальным значением угла возвышения) спутника:

$$\nabla \tilde{Z}_p^{(i-1)} = \tilde{Z}_p^{(i)} - \tilde{Z}_p^{(1)}. \quad (6)$$

Это позволяет исключить погрешность часов приемника из модели задачи, тем самым сократить вектор оцениваемых параметров.

Задача (5) традиционно решается при помощи метода наименьших квадратов, но возможны и другие способы, например, основанные на методе наименьших модулей, реализуемого в форме метода Вейсфельда [Акимов, Деревянкин, Матасов, 2012].

Поскольку речь идет об определении высоты, то для осуществления предлагаемого алгоритма необходимо перейти от гринвичских координат к географическим, используя стандартную матрицу перехода.

Вектор местоположения антенны спутникового приемника в гринвичских осях имеет вид:

$$\eta(\lambda, \varphi, h) = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R_E + h) \cos \varphi \cos \lambda \\ (R_E + h) \cos \varphi \sin \lambda \\ ((1 - e^2)R_E + h) \sin \varphi \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Здесь $R_E = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$ – радиус кривизны первого вертикала; h – высота над эллипсоидом; a – большая полуось эллипсоида; e – квадрат первого эксцентриситета.

Полагая, что значения долготы и широты известны (в нашем случае $\lambda, \varphi = \text{const}$), введем оцениваемый параметр – ошибку определения высоты Δh . Тогда вектор искомой погрешности измерений $\Delta\eta = \eta - \eta'$, $\eta' = \eta(\lambda, \varphi, h')$ примет вид:

$$\Delta\eta = \Delta h \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \lambda \\ \cos \varphi \sin \lambda \\ \sin \varphi \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Измерения $z_p^{(i)}$ “в малом” можно записать в виде следующего уравнения:

$$z_p^{(i)} = h^{*(i)T} x^* + \Delta\rho^{S(i)}, \quad (9)$$

где

$$h^{*(i)T} = (h^{(i)}, 1),$$

$$h^{(i)} = \left(\frac{(\eta_1^{sat(i)} - \eta'_1)}{\rho_{comp}^{(i)}}, \frac{(\eta_2^{sat(i)} - \eta'_2)}{\rho_{comp}^{(i)}}, \frac{(\eta_3^{sat(i)} - \eta'_3)}{\rho_{comp}^{(i)}} \right)^T \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \lambda \\ \cos \varphi \sin \lambda \\ \sin \varphi \end{pmatrix},$$

$$x^* = (\Delta h \ \rho_{\Delta t})^T.$$

Далее формируются первые разности кодовых измерений для исключения погрешности часов, аналогично формуле (6).

В редуцированной задаче теперь фигурирует только один неизвестный параметр – ошибка высоты, в отличие от задачи (5), где оценивается три неизвестных.

Решение полученной задачи (9) осуществляется методом наименьших квадратов или методом наименьших модулей. Аналогичное упрощение проводится для скоростных решений при помощи первичных спутниковых измерений – доплеровских псевдоскоростей и фазовых измерений [Голован, Парусников, 2010].

Экспериментальная проверка модели

В целях экспериментальной проверки теоретических основ было проведено несколько многочасовых сеансов спутниковых измерений на неподвижном основании. Использовался аппаратный комплекс, размещенный в обсерватории на территории научного экспериментального полигона кафедры “Общая и прикладная физика” Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых [Абрамов, Дорожков, Конешов, 2010].

Антенна GPS-приемника была установлена на постаменте внутри помещения геофизической обсерватории, что не оказало значительного влияния на качество измерений, поскольку перекрытия и крыша здания изготовлены из радиопрозрачных материалов (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид установленной на постаменте антенны и GPS-приемник (на столе)

Fig. 1. General view of the antenna mounted on the pedestal and GPS receiver (on the table)

Измерения проводились с частотой 1 Гц и продолжительностью от 8 до 10 ч. Полученные данные обрабатывались по моделям одномерного и стандартного трехмерного решения, результаты для наглядности фильтровались аperiodическим фильтром с интервалом времени равным 1 мин (рис. 2).

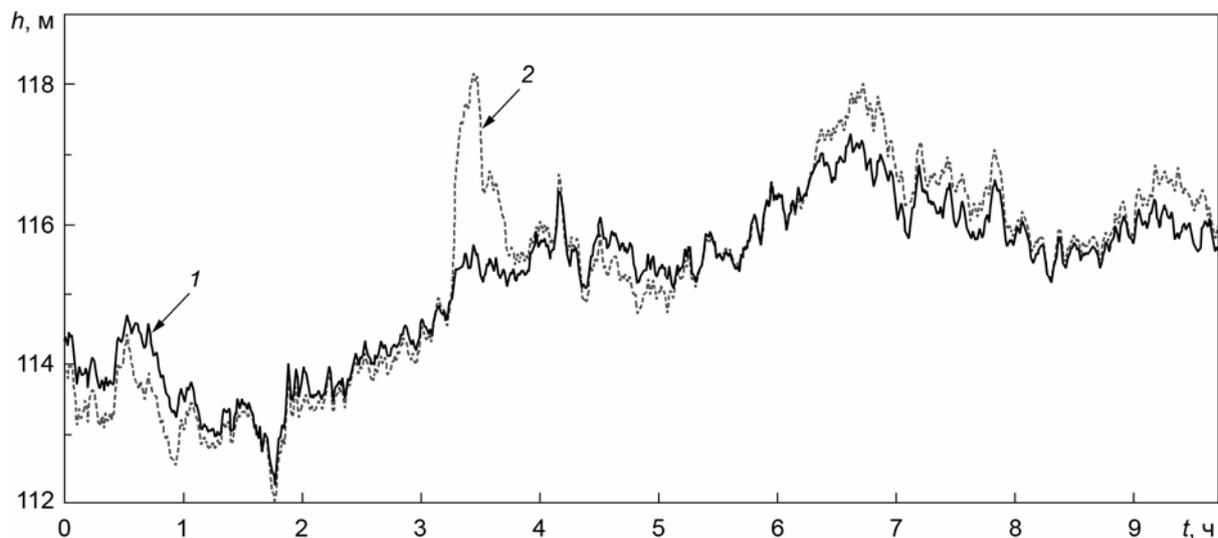


Рис. 2. Фильтрованные результаты обработки измерений (по кодовым псевдодальностям). 1, 2 – модели одномерного (1) и стандартного трехмерного (2) решения

Fig. 2. Filtered results of measurement processing (by code pseudo-ranges). 1, 2 – models of (1) one-dimensional and (2) standard three-dimensional solutions

Значительные изменения высоты для неподвижного приемника по полученным данным являются результатом независимой обработки данных в рамках каждой временной эпохи, равной в нашем эксперименте 1 с. После такой обработки первичных спутниковых измерений остается не сглаженной аппаратная погрешность кодовых псевдодальностей, достигающая ± 3 м [ICD-GPS-200...], но становится нагляднее разница между результатами обработки, полученными по разным алгоритмам.

Учет тропосферных и ионосферных погрешностей проводился по моделям Хопфилда и Клобухара, имеющим остаточные погрешности, что также увеличивает ошибку по высоте [Schüler, 2001; Leick, Rapoport, Tatarnikov, 2015].

Качество полученных результатов определяли оценкой среднеквадратического отклонения нефильтрованных значений высоты, которое на указанном отрезке при применении модели трехмерного решения составило 1.46 м, а при использовании одномерного – 1.20 м.

Полученные результаты продемонстрировали снижение среднеквадратического отклонения по сравнению со стандартным алгоритмом трехмерного решения, что говорит о перспективности использования и развития алгоритма одномерного решения при обработке первичных *GPS* измерений.

Применение алгоритма модели одномерного решения для метода *PPP* также является перспективным направлением исследований, так как активно развивающийся в настоящее время метод *PPP* позволяет решить задачу определения местоположения как в постобработке, так и в режиме реального времени [Martin et al., 2015].

Обсуждение результатов

Основной результат данной работы – это алгоритм обработки первичных спутниковых измерений, с помощью которого появляется возможность в перспективе повысить точность определения высоты подвижного носителя гравиметрической аппаратуры до 18 %.

Предъявляемые требования к точности аэрогравиметрических измерений масштаба 1:200 000 составляют 0.7–1 мГал, что можно представить как 225–324 см, учитывая значение вертикального градиента 0.3086 мГал/м. Применяемый в настоящее время дифференциальный режим, который основан на стандартных кодовых, доплеровских и, частично, фазовых решениях, удовлетворяет данным требованиям.

Предложенный алгоритм, доработанный должным образом в области доплеровских и фазовых решений, может быть осуществлен в дифференциальном режиме для повышения точности позиционирования при проведении аэрогравиметрических работ.

Плановые координаты, необходимые для реализации нового алгоритма, можно получить на основе интегрированных инерциально-спутниковых решений при использовании дифференциального режима работы глобальных навигационных спутниковых систем. Технология получения интегрированных решений давно применяется в аэрогравиметрии. Точность упомянутых решений при разумных длинах базовой линии (расстояние между самолетным приемником и базовой станцией) составляет величину порядка 10 см.

Оценка влияния изменения плановых координат как зафиксированных, так и оставшихся неизмеренными инерциальными системами, на вычисление вертикального положения приемника будет рассматриваться в последующих работах, посвященных динамике измерений.

Заключение

Предложен алгоритм одномерной обработки первичных *GPS* измерений, предназначенный для определения значения высоты спутникового приемника. Анализ статистических характеристик используемых алгоритмов на примере стационарных наблюдений показал снижение среднеквадратического отклонения результатов одномерного решения относительно трехмерного для кодовых измерений на 18 %.

Представляется перспективным решение аналогичных задач для доплеровских и фазовых измерений.

Применение алгоритма одномерной обработки первичных *GPS* измерений в комплексе с интегрированными решениями инерциальных навигационных систем в дальнейшем позволит повысить точность решения задач скалярной гравиметрии при проведении наблюдений с использованием подвижных носителей, а, следовательно, повысить точность аэрогравиметрических работ.

Применение алгоритма модели одномерного решения для метода определения координат *PPP* является перспективным направлением исследований.

Финансирование

Данное исследование выполнено в рамках государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Абрамов Д.В., Дорожков В.В., Конешов В.Н. Особенности построения и использования наземного сейсмогравиметрического комплекса // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46, № 4. С.5–13.
- Акимов П.А., Деревянкин А.В., Матасов А.И. Гарантирующий подход и l_1 -аппроксимация в задачах оценивания параметров БИНС при стендовых испытаниях. М.: Изд-во Московского университета, 2012. 296 с.
- Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А., Трубников С.А. Математические модели и алгоритмы обработки измерений спутниковой навигационной системы GPS. Стандартный режим. М.: Изд-во Московского университета, 2009. 96 с.
- Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Часть 1. Математические модели инерциальной навигации. М.: Изд-во Московского университета, 2010. 126 с.
- Дробышев Н.В., Железняк Л.К., Клевцов В.В., Конешов В.Н., Соловьев В.Н. Методы и проблемы изучения гравитационного поля Мирового океана // Геофизические исследования. 2006. № 5. С.32–52.
- Дробышев Н.В., Конешов В.Н., Конешов И.В., Соловьев В.Н. Создание самолета-лаборатории и методика выполнения аэрогравиметрической съемки в арктических условиях // Вестник Пермского университета. Геология. 2011. № 3. С.37–50.
- Илюхин А.А., Конешов В.Н. Об оценке погрешностей GPS наблюдений при комплексных приливных измерениях // Сейсмические приборы. 2014а. Т. 50, № 4. С.58–65.
- Илюхин А.А., Конешов В.Н. Экспериментальная оценка возможностей GPS позиционирования в условиях геофизической обсерватории // Труды XI Международной научной конференции “Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии” ФРЭМЭ’2014. Владимир; Суздаль: Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 2014б. С.124–127.
- Илюхин А.А., Конешов В.Н. Методические погрешности получения данных о высоте точки наблюдения при обработке GPS в режиме DGPS // Геофизические исследования. 2018. Т. 19, № 2. С.71–80.
- Forsberg R., Skourup H. Arctic Ocean gravity, geoid and sea-ice freeboard heights from ICESat and GRACE // Geophysical Research Letters. 2005. V. 32. L21502. doi: 10.1029/2005GL023711
- ICD-GPS-200. Interface control document. Navstar GPS Space Segment. Navigation User Interfaces. Revision C, IRN-200C-003. El Segundo: ARINC Research Corporation. 1999. URL: <http://geoweb.mit.edu/~tah/icd200c123.pdf>
- Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. GPS Satellite Surveying. 4th Edition. Wiley. 2015. 840 p. ISBN: 978-1-118-67557-1
- Martin A., Anquela A.B., Dimas-Pages A., Cos-Gayon F. Validation of performance of real-time kinematic PPP. A possible tool for deformation monitoring // Measurement. 2015. V. 69. P.95–108.
- Schüler T. On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation: Ph.D. Thesis. München: Universität der Bundeswehr, 2001. 364 p.

Сведения об авторах

ГОЛОВАН Андрей Андреевич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7(495) 939-12-44. E-mail: aagolovan@yandex.ru

ДРОБЫШЕВ Михаил Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук. 123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-24-41. E-mail: drmika88@gmail.com

MODEL OF ONE-DIMENSIONAL PROCESSING OF PRIMARY SATELLITE MEASUREMENTS USED TO DETERMINE ALTITUDE AND VERTICAL SPEED

A.A. Golovan¹, M.N. Drobyshev²

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

² *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Corresponding author: M.N. Drobyshev (e-mail: drmika88@gmail.com)

Abstract. Airborne gravity measurements in hard-to-reach areas of the Earth presuppose highly accurate determination of the coordinates of flying laboratory or other carrier of gravimetric equipment. For these purposes, receivers of signals from satellite navigation systems are used. When solving problems that require accurate information about the change in vertical position of an object, it is proposed to use algorithmic solutions based on reduced models for processing primary satellite measurements. Primary satellite measurements are recorded in parallel with gravimetric observations during surveys, followed by office coprocessing and the quality of its results directly depends on the accuracy of determining the flight altitude on the route. An appropriate processing algorithm is presented, which makes it possible to obtain estimates of the values of altitude and vertical speed with increased accuracy (relative to standard algorithms) by using accurate information about the plane coordinates. Sessions of satellite measurements on a fixed base and a comparative analysis of the calculation results obtained by the proposed and traditional algorithms were carried out. The measurements were carried out with a frequency of 1 Hz and duration of 8 to 10 hours. The quality of the calculated results was determined by estimating the standard deviation of the altitude, which demonstrates a decrease in the amplitude of the spread of instantaneous values to 18 % when using a one-dimensional processing model with respect to a three-dimensional solution. The presented model of one-dimensional processing of primary satellite measurements for determining the altitude and vertical speed proved to be relevant and efficient algorithm. Its potential development in the future will improve the accuracy of solving scalar gravimetry problems during observations using mobile carriers, and, consequently, improve the accuracy of airborne gravimetric work.

Keywords: one-dimensional algorithm, navigation, satellite systems, primary processing of satellite measurements, GPS measurements, dual-frequency receiver, airborne gravimetry.

Funding

This work was carried out within the framework of the state assignment of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

References

- Abramov D.V., Dorojkov V.V., Koneshov V.N., The land based seismic-gravimetric complex creation and exploitation specialties, *Seismicheskie pribory* (Seismic Instruments), 2010, vol. 46, no. 4, pp. 5-13. [In Russian].
- Akimov P.A., Derevyankin A.V., Matasov A.I., *Garantiruyushchii podkhod i l_1 -approximatsiya v zadachakh otsenivaniya parametrov BINS pri stendovykh ispytaniyakh* (Guarantee approach and l_1 -approximation in

- problems of estimation of SINS parameters during bench tests), Moscow: Moscow University Publishing, 2012, 296 p. [In Russian].
- Forsberg R., Skourup H., Arctic Ocean gravity, geoid and sea-ice freeboard heights from ICESat and GRACE, *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, L21502. doi: 10.1029/2005GL023711
- Golovan A.A., Parusnikov N.A., *Matematicheskie osnovy navigatsionnykh sistem. Chast' 1. Matematicheskie modeli inertial'noi navigatsii* (Mathematical foundations of navigation systems. Part 1. Mathematical models of inertial navigation), Moscow: Moscow University Publishing, 2010, 126 p. [In Russian].
- Drobyshev N.V., Koneshov V.N., Koneshov I.V., Solov'ev V.N., Creation of a laboratory aircraft and a technique for performing airborne gravimetric survey in Arctic conditions, *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya* (Perm University Bulletin. Geology), 2011, no. 3, pp. 32-44. [In Russian].
- Drobyshev N.V., Zheleznyak L.K., Klevtsov V.V., Koneshov V.N., Solov'ev V.N., Methods and study of the World Ocean's gravitational field, *Geophysical research*, 2006, no. 5, pp. 32-52. [In Russian].
- ICD-GPS-200. Interface control document. Navstar GPS Space Segment. Navigation User Interfaces. Revision C, IRN-200C-003. El Segundo: ARINC Research Corporation, 1999, URL: <http://geoweb.mit.edu/~tah/icd200c123.pdf>
- Ilyuhin A.A., Koneshov V.N., Experimental assessment of GPS positioning capabilities in a geophysical observatory, in *Trudy XI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii" FREME'2014* (Proceedings of the XI International Scientific Conference "Physics and radio electronics in medicine and ecology" FREME'2014), Vladimir; Suzdal, Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov, 2014, pp. 124-127. [In Russian].
- Ilyuhin A.A., Koneshov V.N., Methodological errors in obtaining data on the height of the observation point when processing GPS in the DGPS mode, *Geophysical research*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 71-80. [In Russian].
- Ilyuhin A.A., Koneshov V.N., On the Estimation of GPS Observation Errors in Complex Tidal Measurements, *Seismic Instruments*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 267-271.
- Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D., *GPS Satellite Surveying*, 4th Edition, Wiley, 2015, 840 p. ISBN: 978-1-118-67557-1
- Martin A., Anquela A.B., Dimas-Pages A., Cos-Gayon F., Validation of performance of real-time kinematic PPP. A possible tool for deformation monitoring, *Measurement*, 2015, vol. 69, pp. 95-108.
- Schüler T., *On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation*, Ph.D. Thesis, Munich, University of the Federal Armed Forces, 2001, 364 p.
- Vavilova N.B., Golovan A.A., Parusnikov N.A., Trubnikov S.A., *Matematicheskie modeli i algoritmy obrabotki izmerenii sputnikovoi navigatsionnoi sistemy GPS. Standartnyi rezhim* (Mathematical models and algorithms for processing measurements of the satellite navigation system GPS. Standard Mode), Moscow: Moscow University Publishing, 2009, 96 p. [In Russian].

About the authors

GOLOVAN Andrey Andreevich – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of laboratory, Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia. Ph.: +7(495) 939-12-44. E-mail: aagolovan@yandex.ru

DROBYSHEV Mikhail Nikolaevich – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-24-41. E-mail: drmika88@gmail.com