

Адаптивное формирование выборки измерений аппаратуры спутниковой навигации высокоорбитального космического аппарата

© Г. В. Скорынина, А. В. Доронкин

АО «Корпорация «Комета», г. Москва, Россия

Реферат

С 2017 г. в АО «Корпорация «Комета» ведётся разработка аппаратуры спутниковой навигации для высокоорбитальных космических аппаратов (КА). Алгоритмы определения положения и скорости КА для такой аппаратуры должны работать в разрывном навигационном поле при малом числе одновременно видимых навигационных спутников и медленном изменении взаимного расположения навигационных спутников и КА. Указанные обстоятельства часто приводят к плохой обусловленности задачи обработки измерений аппаратуры спутниковой навигации.

В комплексе алгоритмов для вышеупомянутой аппаратуры спутниковой навигации задача определения вектора положения и скорости КА решается в несколько этапов: получение начального приближения, накопление сглаженных измерений, формирование нормального места, обработка нормальных мест. Наиболее трудным с вычислительной точки зрения является этап формирования нормального места, на котором с помощью метода наименьших квадратов обрабатываются сглаженные измерения. Чтобы избежать плохой обусловленности в задаче формирования нормального места, используется алгоритм адаптивного формирования выборки. В его основе лежит оценка обусловленности решаемой задачи при каждом поступлении новых сглаженных измерений. Алгоритм обработки запускается только в том случае, если задача оказывается хорошо обусловленной.

В отличие от специальных методов решения плохо обусловленных задач алгоритм адаптивного формирования выборки измерений не требует большого объёма дополнительных вычислений и сложного анализа их результатов. При его применении автоматически определяется величина интервала накопления сглаженных измерений для формирования нормального места. По результатам моделирования использование этого алгоритма обеспечивает сходимость алгоритма формирования нормальных мест примерно в 98 процентах случаев, позволяя получить оценку вектора положения и скорости КА с необходимой точностью.

Ключевые слова: спутниковая навигация, высокоорбитальный космический аппарат, плохая обусловленность.

Контакты для связи: Скорынина Галина Владимировна (silence1985@yandex.ru).

Для цитирования: Скорынина Г. В., Доронкин А. В. Адаптивное формирование выборки измерений аппаратуры спутниковой навигации высокоорбитального космического аппарата // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 59. С. 14–18.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.59.14-18>

The Algorithm of Adaptive Measurements Sampling for Satellite Navigation Equipment on High-orbit Spacecraft

G. V. Skorynina, A. V. Doronkin

JSC “Kometa Corporation”, Moscow, Russia

Abstract

Since 2017 Kometa Corporation, JSC has been developing satellite navigation equipment for high-orbit spacecrafts. Algorithms of position and velocity evaluation for such equipment must operate in discontinuous navigational field when a number of visible navigational satellites is small, and relative location of spacecraft and navigational satellites changes slowly. These circumstances often lead to ill-conditioned problems of measurements processing.

Position and velocity evaluation process in the algorithms for the above mentioned satellite navigation equipment consists of four stages: getting an initial approximation vector, collecting of smoothed measurements, getting a normal place, and normal places processing. At the stage of getting a normal place smoothed measurements are processed with the Least Squares Method. This stage is often associated with computational problems. The algorithm of adaptive measurements sampling is used to avoid bad conditioning in the algorithm of getting a normal place. In this algorithm conditioning is estimated every time when new smoothed measurements are obtained. One should start the algorithm of getting a normal place only if smoothed measurements processing is a well-conditioned problem.

Specific methods for solving ill-conditioned problems often require a lot of auxiliary calculations and analysis of their results. It is not necessary for the algorithm of adaptive measurements sampling. This algorithm allows selecting duration of smoothed measurements collection automatically. According to simulation results the algorithm of adaptive

measurements sampling ensures that the algorithm of getting a normal place will converge in approximately 98 percent cases. At the same time this algorithm provides required accuracy of position and velocity estimation.

Keywords: satellite navigation, high-orbit spacecraft, bad conditioning.

Contacts: Galina Skorynina (silence1985@yandex.ru).

For citation: Skorynina G. V., Doronkin A. V. The Algorithm of Adaptive Measurements Sampling for Satellite Navigation Equipment on High-orbit Spacecraft // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 59. P. 14–18. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.59.14-18>

Введение

В последние годы в отечественной и зарубежной литературе активно обсуждается задача спутниковой навигации высокоорбитальных и межпланетных космических аппаратов (Бартенев и др., 2014; Biswas, Dempster, 2019; Capuano, et al., 2017; Михайлов, Кошаев, 2014). Она существенно отличается от задачи спутниковой навигации наземного потребителя или потребителя на низкой околоземной орбите.

В последнем случае потребитель находится в сплошном навигационном поле, причём количество навигационных спутников, наблюдаемых им в каждый момент времени, и их взаимное расположение таковы, что можно вычислять положение приёмника спутниковых сигналов, его скорость и уход часов по одномоментным измерениям псевдодальностей и псевдоскоростей (Перов, Харисов, 2010; Kaplan, 2006). Этот метод не требует задания какой-либо модели движения потребителя, что можно отнести к его достоинствам. Но в то же время при обработке одномоментных измерений невозможно определить взаимные корреляционные моменты ошибок компонент векторов положения и скорости. Кроме того, в таком алгоритме не учитывается априорная информация о координатах, составляющих вектора скорости, уходе часов и уходе частоты опорного генератора, полученная на предыдущих тактах работы приёмника. Чтобы уйти от указанных недостатков, используются динамические методы определения положения и скорости потребителя, например фильтр Калмана (Avanzi, et al., 2014).

Движение высокоорбитальных КА происходит в разрывном навигационном поле. Моделирование показывает, что для КА на геостационарной орбите и в апогейной части высокоэллиптической орбиты при работе по сигналам ГЛОНАСС значительную часть времени число видимых навигационных космических аппаратов (НКА) не превышает двух, а продолжительность интервала времени, на котором навигационное поле отсутствует, может быть больше одного часа. В таких условиях навигация по одномоментным измерениям становится невозможной.

В литературе описаны два подхода к решению навигационной задачи на борту высокоорбитального космического аппарата: обработка измере-

ний, накопленных на некотором временном интервале (Бартенев и др., 2014), и применение различных модификаций фильтра Калмана (Biswas, 2019; Capuano, et al., 2017; Михайлов, 2014). Возможно также использование навигационной аппаратуры, интегрированной в контур управления КА и учитывающей дополнительную информацию от других его систем и даже наземных измерительных средств (Кружков, 2012).

С 2017 г. в АО «Корпорация «Комета» ведётся разработка аппаратуры спутниковой навигации (АСН) для высокоорбитальных КА. В комплексе алгоритмов для этой АСН вычисление вектора параметров движения центра масс (ПДЦМ) КА разбито на несколько этапов. На каждом из них производится статистическая обработка имеющихся измерений или ранее найденных оценок векторов ПДЦМ КА.

На первом этапе получается начальное приближение, в качестве которого может быть взят либо вектор, заданный извне, либо вектор, определённый в результате обработки одномоментных спутниковых измерений псевдодальностей и псевдоскоростей.

Следующий этап — накопление сглаженных измерений. Сглаживание выполняется путем аппроксимации полиномом второй степени измерений псевдодальности и псевдоскорости на интервалах длиной 20 с с последующим определением сглаженного значения измерения и его апостериорной дисперсии. Это позволяет уменьшить корреляцию ежесекундных измерений, обусловленную медленно меняющейся ошибкой эфемерид навигационных спутников. Величина интервала накопления сглаженных измерений непостоянна и зависит от внешних условий.

Как только накопление сглаженных измерений завершено, выполняется их обработка с помощью метода наименьших квадратов, в результате чего формируется уточнённая оценка ПДЦМ КА — так называемое нормальное место. Нормальное место заносится в базу нормальных мест.

На заключительном этапе выполняется обработка всех нормальных мест, содержащихся в базе, на интервале времени, сравнимом с периодом обращения КА.

При моделировании работы комплекса алгоритмов выяснилось, что наиболее трудным с вы-

числительной точки зрения является этап формирования нормального места.

Оценка вектора ПДЦМ КА на этом этапе получается итерационно. На каждой итерации решается система нормальных уравнений вида

$$(A^TWA)\Delta X = A^TW\eta, \quad (1)$$

где A — матрица частных производных измеряемых величин по оцениваемым параметрам, W — весовая матрица ошибок измерений, η — вектор невязок, ΔX — вектор поправок к текущему приближению вектора ПДЦМ КА.

Анализ результатов моделирования показал, что сходимость итерационного процесса получения оценки вектора ПДЦМ КА существенно зависит от обусловленности матрицы системы нормальных уравнений A^TWA , которая для высокоорбитальных КА часто оказывается плохой. В таких случаях итерационный процесс либо расходится, либо приводит к большим погрешностям определения вектора положения и скорости КА, что в свою очередь делает невозможным получение окончательной оценки ПДЦМ КА с требуемой точностью. Необходимо было найти решение этой проблемы, которое позволило бы комплексу алгоритмов АСН эффективно работать даже в условиях частой плохой обусловленности.

Алгоритм адаптивного формирования выборки измерений

Очевидный способ преодоления вышеупомянутого затруднения — применение специальных методов решения плохо обусловленных задач (Тихонов, Арсенин, 1979; Кабанихин, 2009). Теория этих методов достаточно хорошо разработана, что позволяет успешно использовать их при решении разного рода практических задач. Но в большинстве случаев решение конкретной плохо обусловленной задачи является целью работы исследователя и выполняется под его непосредственным контролем. Это даёт возможность проводить дополнительные, зачастую довольно сложные, вычисления, связанные с разложением матриц в произведение или поиском собственных значений матриц, варьировать величину параметра регуляризации, выбирая ту, которая обеспечивает лучший результат.

В случае определения вектора ПДЦМ на борту КА плохо обусловленная задача формирования нормального места представляет собой лишь один из этапов на пути к получению результата. Данная задача в процессе функционирования КА должна решаться многократно без какого-либо участия оператора, то есть анализ качества полученного решения должен проводить сам алгоритм формирования нормальных мест. Как показало моделирование работы комплекса алгоритмов АСН, для КА на высокоэллиптической орбите в

области перигея новое нормальное место получается примерно раз в минуту. Учитывая ограниченность вычислительных ресурсов, в такой ситуации представляется разумным уйти от необходимости решения плохо обусловленных задач, например с помощью подходящего способа формирования выборки измерений.

Причина плохой обусловленности матрицы системы нормальных уравнений (1) заключается, главным образом, в особенностях геометрии расположения КА и навигационных спутников относительно друг друга (близость видимых НКА, их малое число, медленное изменение взаимного положения КА и НКА). Движение КА и НКА по орбитам периодически приводит к существенному изменению их взаимного расположения и, как следствие, улучшению обусловленности решаемой задачи. Если запускать алгоритм обработки измерений только в благоприятный момент, когда матрица системы (1) хорошо обусловлена, он с большой вероятностью сойдётся и даст оценку вектора положения и скорости КА с необходимой точностью.

Чтобы отследить этот благоприятный момент, используется алгоритм адаптивного формирования выборки измерений. Принцип его работы основывается на следующих рассуждениях.

При вычислении вектора поправок ΔX к уточняемому вектору ПДЦМ КА матрица системы нормальных уравнений (1) обращается. Если она плохо обусловлена, в процессе обращения вычислительные ошибки сильно растут, что приводит к неточной оценке вектора поправок. Если она обусловлена хорошо и вычислительные ошибки при обращении растут незначительно, итерационный процесс быстро сходится и в результате получается уточнённый вектор ПДЦМ КА.

В свете вышеизложенного для оценки обусловленности матрицы A^TWA удобно использовать норму матрицы $P = (A^TWA)^{-1} \times (A^TWA)$ (проще всего использовать нормы $\| \cdot \|_1$ и $\| \cdot \|_\infty$). При точном вычислении матрицы $(A^TWA)^{-1}$ справедливо равенство $(A^TWA)^{-1} \times (A^TWA) = I$, где I — единичная матрица. В этом случае $\|I\|_1 = \|I\|_\infty = 1$. При вычислении матрицы $(A^TWA)^{-1}$ с ошибками $P \neq I$, поэтому нормы будут отличаться от единицы.

Матрица системы нормальных уравнений A^TWA и соответствующее значение нормы матрицы P вычисляются каждые 20 с при появлении новых сглаженных измерений. Заранее заданное пороговое значение нормы определяет допустимый уровень вычислительных ошибок. Если норма матрицы P превышает этот порог, ошибки слишком велики, поэтому запускать обработку измерений нецелесообразно и нужно продолжать

формирование выборки. В противном случае необходимо запустить алгоритм обработки измерений для получения нормального места. Таким образом алгоритм адаптивного формирования выборки определяет необходимую продолжительность интервала накопления сглаженных измерений.

На рис. 1 и рис. 2 приведены диаграммы, иллюстрирующие результаты работы комплекса алгоритмов АСН. На вход алгоритмов поступала информация от приёмной аппаратуры, сопряжённой с имитатором навигационных сигналов ГЛОНАСС. Для каждой диаграммы по горизонтальной оси

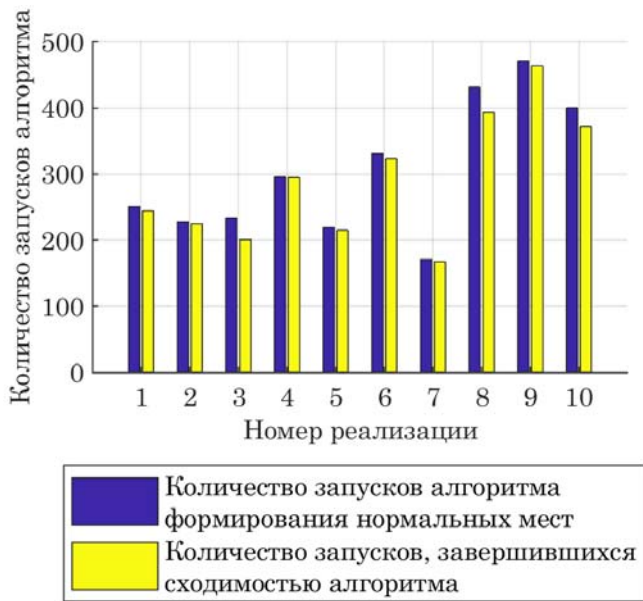


Рис. 1. Соотношение общего количества запусков алгоритма формирования нормальных мест и количества успешных запусков, завершившихся сходимостью алгоритма

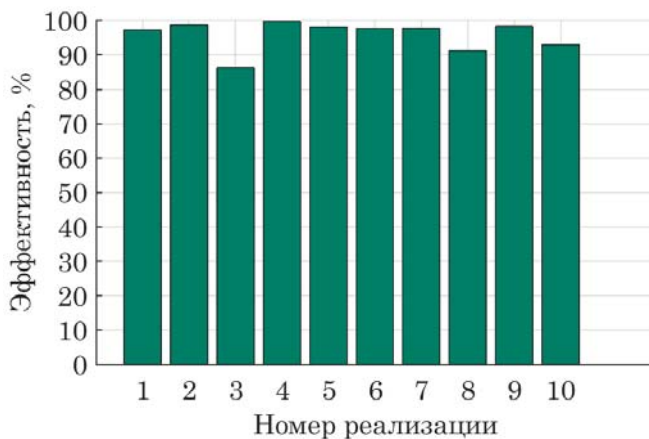


Рис. 2. Эффективность алгоритма адаптивного формирования выборки измерений, определённая как доля успешных запусков алгоритма формирования нормальных мест

отложен номер реализации сценария движения КА. На рис. 1 показано соотношение общего количества запусков алгоритма формирования нормальных мест и количества успешных запусков, завершившихся сходимостью алгоритма. На рис. 2 представлена доля успешных запусков алгоритма формирования нормальных мест, демонстрирующая эффективность работы алгоритма адаптивного формирования выборки. Видно, что этот алгоритм, основанный на анализе вычислительных особенностей задачи, приводит к сходимости итерационного процесса при обработке измерений примерно в 98 % случаев.

Заключение

Результаты проведённого моделирования позволяют утверждать, что рассмотренный в статье алгоритм адаптивного формирования выборки измерений обладает рядом достоинств и может быть использован на практике для решения задачи спутниковой навигации высокоорбитальных КА. В отличие от специальных методов решения плохо обусловленных задач он не требует большого объёма дополнительных вычислений. Его использование позволяет автоматически определять величину интервала накопления сглаженных измерений и получать оценки вектора ПДЦМ КА с требуемой точностью, несмотря на то, что при обработке измерений не применяются специальные методы решения плохо обусловленных задач. При этом алгоритм адаптивного формирования выборки основан на анализе вычислительных особенностей задачи, что приводит к сходимости алгоритма формирования нормальных мест почти в 98 % случаев.

Литература

- ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
- Кабанихин С. И. Обратные и некорректные задачи. Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009. 457 с.
- Кружков Д. М. Оценка точности астро-спутниковой интегрированной навигационной системы спутника связи // Труды МАИ. 2012. Вып. 51. С. 1–23.
- Михайлов Н. В., Кошаев Д. А. Решение задачи навигации для геостационарного космического аппарата на основе уравнений его динамики и эпизодических измерений от навигационных спутников // Гирскопия и навигация. 2014. № 4(87). С. 16–35.
- Современные и перспективные информационные ГНС-технологии в задачах высокоточной навигации / Под ред. В. А. Бартенева, М. Н. Красильщикова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 191 с.
- Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 283 с.
- Avanzi A., Garcia A., Tortora P. Implementation and tuning of LEO satellites real-time navigation algorithm based on single frequency GPS measurements // 2014 7th

ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), December 3–5, 2014. Proceedings. 2014. P. 1–8.

Biswas S., Dempster A. GNSS-based spacecraft navigation in elliptical and High Earth Orbits using Single Propagation Unscented Kalman Filters // 2019 Fifth Indian Control Conference (ICC), January 9–11, 2019. Proceedings. 2019. P. 283–288.

Capuano V., Blunt P., Botteron C., Farine P. A. Orbital filter aiding of a high sensitivity GPS receiver for lunar missions // Navigation, Journal of the Institute of Navigation. 2017. Vol. 64, no. 3. P. 323–338.

Kaplan E. D. Understanding GPS: Principles and applications. Boston, London, 2006. 723 p.