

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ЭФЕМЕРИДНО-БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЛОНАСС

Владимир Сергеевич Крылов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, преподаватель кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. +7 (923) 223-39-97, e-mail: basnivova@mail.ru

Александр Сергеевич Толстиков

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, д.т.н., профессор кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. +7 (913) 940-13-23, e-mail: tolstikov@sstf.nsk.ru

В статье показана возможность применения метода инструментальных переменных для улучшения свойств матрицы системы алгебраических уравнений. Рассматривается задача траекторных измерений от сети наземных беззапросных измерительных станций по навигационным спутникам ГЛОНАСС. Необходимость повышения информативности траекторных измерений особенно актуальна для траекторных измерений в южном полушарии Земли, где существует малое количество измерительных станций. Приведены результаты численного эксперимента с использованием имитационного моделирования траекторных измерений движения навигационного спутника от двух и трех беззапросных измерительных станций, имеющих геометрические ограничения. Показывается возможность повышения информативности измерений от таких базовых станций при использовании метода инструментальных переменных. Сравнение показателя информативности траекторных измерений производится по степени обусловленности матрицы решаемой системы алгебраических уравнений. По результатам численного эксперимента сделан вывод о возможности повышения информативности траекторных измерений от сети беззапросных измерительных станций, имеющих геометрические ограничения, с привлечением к обработке метода инструментальных переменных. Количественная оценка повышения информативности получена в виде уменьшения числа обусловленности матрицы решаемой системы более чем на один порядок. В дальнейшем прогнозируется исследование возможности повышения информативности траекторных измерений для различных базисных функций, применяемых в качестве инструментальных переменных, и их влияния на уменьшение геометрических ограничений неравномерной сети измерительных станций.

Ключевые слова: искусственный спутник Земли, орбитальная группировка, эфемериды, траекторные измерения, уравнения измерений, начальные условия, инструментальные переменные, обусловленность

IMPROVING THE INFORMATIVITY OF TRAJECTORY MEASUREMENTS FOR GLONASS EPHEMERIS AND BALLISTIC SUPPORT

Vladimir S. Krylov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Lecturer, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: +7 (923) 223-39-97, e-mail: basnivova@mail.ru

Alexander S. Tolstikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Lecturer, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: +7 (913) 940-13-23, e-mail: tolstikov@sstf.nsk.ru

Possibilities of the instrumental variables method using to improve the matrix properties of algebraic equations system are shown in the article. The problem of trajectory measurements from a network of ground-based, no-demand measuring stations using GLONASS navigation satellites is considered. The need to increase information content of trajectory measurements is especially important for trajectory measurements in the southern hemisphere of the Earth with a small number of measuring stations. The numerical experiment results of trajectory measurements of the navigation satellite movement from two and three request-free measuring stations with geometric constraints with use of simulation modeling are presented. The possibility of the measurements' information content increasing from such base stations using the instrumental variables method is shown. Comparison of an indicator of the trajectory measurements informativity is made according to the degree of the matrix conditionality of the algebraic equations system being solved. Based on the results of the numerical experiment, it is concluded that it is possible to increase the information content of trajectory measurements from a network of non-query measuring stations with geometric constraints, involving the method of instrumental variables in processing. A quantitative estimation of the increase in information content was obtained in the form of a decrease in the condition number of the system matrix being solved by more than one order of magnitude. In the future, the research is predicted on the possibility of the trajectory measurements informativeness increasing for various basic functions used as instrumental variables, and their effect on the geometric constraints reducing an uneven network of measuring stations.

Keywords: artificial Earth satellite, orbital group, ephemeris, trajectory measurements, equation of measurements, starting conditions, instrumental variables, conditionality

Введение

Определение орбит космических объектов, движущихся в поле притяжения тел с большой массой – классическая задача «Небесной механики» [1].

С развитием спутниковых навигационных технологий существенно возросли требования к точности и надежности позиционирования навигационных спутников (НС) на орбитах. При этом высокоточное определение параметров движения НС является ключевой задачей эфемеридно-баллистического обеспечения (ЭБО) спутниковых навигационных систем [2].

Методы и материалы

Движение орбитальной группировки НС в околоземном пространстве описывается в общем случае дифференциальным уравнением вида [2]:

$$u(t) = F(u(t), s(t), \theta_1), t \in [t_0, t_N], \quad (1)$$

где $u(t) \in R^n$ – расширенный вектор состояния орбитальной группировки n НС, включающий в себя параметры движения каждого спутника

$$u_i^T(t) = (x_i(t), y_i(t), z_i(t), \dot{x}_i(t), \dot{y}_i(t), \dot{z}_i(t)), i = 1, \dots, n;$$

$s(t)$ – вектор возмущений, влияющих на движение спутника, таких как гравитационное воздействие Луны и Солнца, несферичность гравитационного поля Земли, радиационное давление солнечного излучения и другие воздействия различной природы [2-4];

θ_1 – вектор параметров модели движения, включающий в себя вектор начальных условий

$$u_i^T(t_0) = (x_i(t_0), y_i(t_0), z_i(t_0), \dot{x}_i(t_0), \dot{y}_i(t_0), \dot{z}_i(t_0)), i = 1, \dots, n;$$

вектор параметров моделей радиационного давления, параметров вращения Земли и другие параметры

$F(\cdot)$ – гладкая вектор функция, допускающая дифференцирование по компонентам вектора состояния $u_i(t)$, вектора возмущений $s_i(t)$ и вектора параметров θ_1 .

Исходную информацию для вычисления оценок параметров движения НС $\hat{u}(t_k), t_k \in [t_0, t_N]$ получают из результатов траекторных измерений $D(t_k) \in R^m$, выполняемых с сети беззапросных измерительных станций (БИС), в зонах радиовидимости которых находятся НС орбитальной группировки. В общем виде уравнение траекторных измерений имеет вид

$$D(t) = H(u(t), w(t), \theta_2) + V(t), \in [t_0, t_N], \quad (2)$$

где: $D(t)$ – вектор кодовых и фазовых псевдодальномерных измерений, выполняемых с сети m БИС;

$H(\cdot) \in R^m$ - нелинейная m -мерная вектор функция, допускающая дифференцирование по $u(t)$, $w(t)$ и θ_2 ;

$w(t)$ – вектор факторов, влияющих на точность псевдодальномерных измерений (уходы бортовых часов НС и часов БИС, задержки навигационного сигнала в ионосферном и тропосферном слоях, неоднозначности фазовых измерений, проявление многопутности распространения навигационного сигнала и другие факторы);

θ_2 – вектор неизвестных параметров математических моделей влияющих факторов (параметров нестабильности применяемых часов, параметры моделей тропосферной и ионосферной задержек и другие параметры);

$V(t)$ – m -мерный вектор случайных погрешностей псевдодальномерных измерений.

Важной особенностью существующей конфигурации сети БИС, выполняющих траекторные измерения для целей ЭБО ГЛОНАСС, является недостаточное покрытие орбит НС ГЛОНАСС измерениями в южном полушарии Земли. В этих условиях представляется актуальным поиск путей к повышению информативности траекторных измерений по НС ГЛОНАСС, выполняемых с сети БИС недостаточной плотности.

Предлагаемый подход к повышению информативности траекторных измерений основан на формировании дополнительных уравнений вида (2) с помощью «инструментальных переменных» [5]. Повышение информативности траекторных измерений в рамках предлагаемого подхода трактуется следующим образом.

В подавляющем большинстве случаев построение эффективных моделей движения НС включает в себя задачу оценивания расширенного вектора состояния динамической системы, описываемой уравнениями (1), (2), путем решения системы алгебраических уравнений вида

$$U(t) \cdot x = Y(t) + \delta(t) \quad (3)$$

с неточно заданной правой частью $\delta(t)$ относительно расширенного вектора состояния системы x . Здесь $Y(t)$ – вектор траекторных измерений по орбитальной группировке НС. Вектор $\delta(t)$ включает в себя все факторы, влияющие на точность измерений. При этом погрешность оценивания вектора x в равной мере зависит от величины модуля вектора $\delta(t)$ и от степени обусловленности матриц $U^T(t) \cdot U(t)$.

Предлагаемый подход к повышению информативности траекторных измерений направлен на улучшение степени обусловленности информационной матрицы $U^T(t) \cdot U(t)$ путем формирования дополнительных уравнений вида (3) с помощью метода «инструментальных переменных» [5], что эквивалентно привлечению в качестве источника измерительной информации для оценивания x некоторых дополнительных «виртуальных» БИС.

Далее, для упрощения изложения, не изменяющего идейную сторону предлагаемого подхода к повышению информативности траекторных измерений, будем рассматривать линеаризованные уравнения псевдодальномерных измерений (2) для одного выбранного НС в зоне радиовидимости сети БИС в отсутствие факторов, влияющих на результаты измерений.

$$p_j(t) = p_{j0}(t) + h_j^T(t) \cdot u^T(t) + q_j(t), j = 1, \dots, m \quad (4)$$

Где $u^T(t) = (x(t), y(t), z(t))$ – вектор текущих координат НС, $h_j^T(t) = \frac{\partial p_j(t)}{\partial u^T(t)}$,

$j = 1, \dots, m$ – вектор направляющих косинусов на радиотрассе идущих от НС до БИС, $q_j(t)$ – погрешности линеаризации геометрической дальности и случайные

погрешности с ограниченной дисперсией, $p_j(t)$ – измеренные значения псевдодальности, $p_{j0}(t)$ – вычисленные дальности от БИС до опорной орбиты, заданной эфемеридами НС и подлежащей уточнению.

Рассматривая движение НС по касательной к орбите, вектор $u^T(t) = (x(t), y(t), z(t))$ может быть представлен равенством:

$$u^T(t) = \Phi(t, t_0) \cdot u^T(t_0) \quad (5)$$

с помощью матрицы изохронных производных [6]

$$\Phi(t, t_0) = \frac{\partial(x(t), y(t), z(t))}{\partial(x(t_0), y(t_0), z(t_0))}$$

Подстановка (5) в (4) приводит к системе m линейных алгебраических уравнений с неточно заданной правой частью вида (3).

Восстановление орбиты НС (согласно [6, 7] – дифференциальное исправление орбит) сводится к оцениванию вектора начальных условий уравнения движения НС $u^T(t_0) = (x(t_0), y(t_0), z(t_0))$ по результатам траекторных измерений $p_j(t_0) \cdot p(t), t \in [t_0, t_N]$ путем решения (4) с учетом (5) и последующему интегрированию уравнений движения НС (1) с полученными оценками вектора начальных условий $\hat{u}(t_0)$. Важным условием точного воспроизведения орбиты НС является требования точности оценивания вектора $u^T(t_0) = (x(t_0), y(t_0), z(t_0))$.

Трудности, возникающие на этом пути связаны с плохой обусловленностью системы алгебраических уравнений (4) в силу зависимости векторов направляющих косинусов близкой к линейной.

Преодолеть эти трудности удастся за счет привлечения метода «инструментальных переменных» [5], позволяющего на базе уравнений измерений (4) формировать дополнительные уравнения, линейно не зависящие от (4).

Для реализации этого подхода левая и правая части уравнения измерений (4) почленно умножаются на выбранную определенным образом инструментальную переменную $y_l(t), l = 1, \dots, L$ и интегрируются на интервале наблюдений $t \in [t_0, t_N]$

$$\int_{t_0}^{t_N} y_l(t) \cdot (p_j(t) - p_{0j}(t)) \cdot dt = \int_{t_0}^{t_N} y_l(t) \cdot h_j^T(t) \cdot \Phi(t_0, t) \cdot dt \cdot u(t_0) + \int_{t_0}^{t_N} y_l(t) \cdot q_j(t) \cdot dt, l = 1, \dots, L$$

Эти уравнения становятся дополнительными в системе алгебраических уравнений (3).

Необходимо заметить что, для выбора инструментальных переменных $y_l(t), l = 1, \dots, L$, в задаче доопределения уравнений тракторных измерений требуются дополнительные исследования характера изменения направляющих косинусов $h_j(t)$ для конкретной конфигурации сети БИС.

Результаты

Для иллюстрации описанного подхода был выполнен модельный эксперимент. В качестве инструмента моделирования использовался программный имитатор измерительной информации, поступающей от орбитальных группировок НС ГЛОНАСС и GPS ModBIS24 [8, 9]. Имитатор ModBIS24 обеспечивает задание сети БИС на поверхности Земли, расчет движения орбитальной группировки НС, расчет геометрических дальностей от всех НС до заданных БИС, имитацию факторов, влияющих на движение НС и влияющих на точность тракторных измерений.

Имитатор имеет удобный пользовательский интерфейс и возможность сохранять результаты моделирования в базе данных. Имитатор обеспечивает вычисление матрицы изохронных производных $\Phi(t_0, t_N)$ в виде конечных разностей [6].

В процессе экспериментов сравнивались три задачи

1. НС наблюдался с двух БИС на интервале $t \in [t_0, t_N]$
2. НС наблюдался с трех БИС на интервале $t \in [t_0, t_N]$.
3. НС наблюдался с двух БИС, для которых уравнение измерений дополнялось уравнениями, полученными с помощью инструментальной переменной вида: $y = a \cdot \sin(\omega t + \varphi)$.

Эффективность схем оценивания начальных условий $u(t_0)$ характеризовалась числом обусловленности матрицы $U^T(t) \cdot U(t)$ для каждого эксперимента.

Результаты расчета чисел обусловленности приведены в табл. 1:

Таблица 1

Сравнение чисел обусловленности

Эксперимент	Число обусловленности
1	6829,4
2	6454,6
3	474,3

Обсуждение

Сравнение чисел обусловленности показало, что привлечение дополнительных станций БИС не приводит к кардинальному улучшению решения задачи определения параметров НС, а применение инструментальных переменных позволяет на порядок снизить чувствительность к изменениям в правой части уравнений, возникающих из-за погрешностей, что приводит к более устойчивому решению системы алгебраических уравнений вида (3). В дальнейшем прогнозируются исследования возможности повышения информативности траекторных измерений для различных базисных функций, применяемых в качестве инструментальных переменных, и их влияния на уменьшение геометрических ограничений неравномерной сети измерительных станций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Брауэр Д., Клеменс Дж. Методы небесной механики. – М.: Мир, 1964. – 513 с.
- Дубошин Г.Н. Справочное руководство по небесной механике. – М.: Наука, 1978. – 864 с.
- Шебшаевич В.С. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. – М.: Радио и связь, 1993. – 408с.
- Харисов В.Н., Перов А.И., Болдин В.А. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. – М.: ИПРЖР, 1998. – 400 с.
- ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.1. М.: РНИИКП, 2008.
- Бартенев В.А., Гречкосеев А.К., Козорез Л.А., Красильщиков М.Н. и др. Современные и перспективные информационные ГНСС-технологии в задачах высокоточной навигации. – М.: Физматлит, 2014. – 192 с.
- NAPEOS. Mathematical Models and Algorithms. – Springer, 2009. – 150 p.
- Толстикова А.С., Томилов А.С., Чубич В.М., Черникова О.С. Алгоритмические пути повышения точности координатно-временных определений. Доклады международного симпозиума «Метрология времени и пространства». – Москва, 2018.
- Владимиров В.М., Гречкосеев А.К., Толстикова А.С. Имитатор измерительной информации для отработки эфемеридно-временного обеспечения космической навигационной системы ГЛОНАСС / Измерительная техника. – 2004. – № 8. – С. 12–14.
- Урмаев М.С. Орбитальные методы космической геодезии. – М.: Наука, 1981. – 256 с.
- Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. – М.: Картгеоцентр, 2006.
- M.S. Grewal, A.P. Andrews Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB. 2nd ed. – John Wiley & Sons, New York, USA, 2001.
- Бартнев В.А., Гречкосеев А.К. Комбинированный алгоритм определения и прогнозирования параметров движения ИСЗ с использованием адаптации / Космические исследования. – 1986. – Вып. 4. – С. 564–574.
- R Stoica and T. Söderström, Instrumental Variable Methods for System Identification, Springer. (2002).

© В. С. Крылов, А. С. Толстикова, 2021