

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В.И. Кокорин, А.А. Федоров\*

*В работе проанализирована математическая модель навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS, реализованная на основе предварительно записанных навигационных данных с помощью аппаратуры навигации. Благодаря цифровой информации были созданы сценарии для воспроизведения группировки навигационных космических аппаратов под управлением имитатора навигационных сигналов. Созданные сценарии использовались для получения группировки навигационных космических аппаратов, необходимой для определения вектора состояния потребителя. Приложения по моделированию группировки спутниковых навигационных систем являются перспективным направлением развития программно-аппаратных комплексов для проверки бурно развивающегося потребительского сегмента спутниковой навигации.*

Развитие потребительского сегмента, а также повышение качества предоставляемых услуг спутниковыми навигационными системами требуют создания математических моделей, позволяющих описать работу данных систем для проведения всесторонних испытаний потребительской аппаратуры и моделирования группировки навигационных космических аппаратов (НКА).

Известны работы, в которых аппаратура навигации и спутниковая навигационная система GPS моделировались целиком с помощью математических моделей. Так, в работе [1] разработанный программный имитатор навигационного сигнала GPS моделирует навигационный сигнал на промежуточной частоте, не рассматривая вопросы, связанные с поведением и обработкой сигнала на радиочастоте. Работа созданной программной модели имитатора навигационных сигналов GPS проверялась с помощью программного приемника GPS. Кроме того, сигнал, формируемый моделью, сравнивался с аналогичным сигналом под управлением имитатора STR4500, позволяющего сформировать сигнал, аналогичный тому, что формируют НКА GPS.

Большой интерес к развитию моделей навигационных систем связан с тем, что радионавигационное поле, сформированное НКА, используется не только для определения координат потребителя, находящегося вблизи поверхности земли, но также и для определения вектора состояния космических аппаратов [2-7].

Для проверки аппаратуры навигации требуется воспроизвести сигнал, аналогичный тому, что формирует НКА. Для этой цели используют аппаратные имитаторы навигационных сигналов, позволяющие сформировать сигнал на заданной частоте Доплера, с необходимой задержкой и уровнем ослабления [8-10].

Возможны варианты создания имитаторов навигационных сигналов без внешнего управления математических моделей [11]. Ценность подобных аппаратных решений заключается в первую очередь в простоте создания подобных устройств, способных достаточно быстро проверить основные технические параметры навигационной аппаратуры, в том числе и в полевых условиях.

Наиболее распространенным средством имитации радионавигационного сигнала НКА являются программно-аппаратные комплексы, позволяющие смоделировать навигационную ситуацию спутниковой ра-

---

\* © В.И. Кокорин, А.А. Федоров, Красноярский государственный технический университет, 2006; E-mail: antfedorov@gmail.com

дионавигационной системы, используя аппаратуру имитации навигационных сигналов под управлением математических моделей [12].

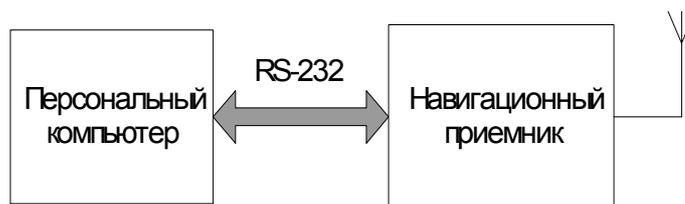
Математические модели позволяют создать сценарии – набор данных, по которым формируются требуемые созвездия НКА. В большинстве случаев для создания сценариев работы имитатора применяют математические модели навигационных параметров, дающих возможность формировать заданные траектории НКА, которые представляет собой комплексное программное обеспечение, включающее в себя модули расчета положения космического объекта, расчет измерительной информации, расчет эфемерид GPS или ГЛОНАСС, расчет альманахов и т.д. Математическая модель в режиме реального времени выдает данные для моделирования навигационной ситуации и управления процессом имитации.

Исходные данные для модели обычно вводятся вручную в зависимости от той ситуации, которую требуется симитировать. Практический интерес представляет возможность записывать навигационным приемником реальные навигационные данные, а потом воспроизводить их при помощи имитатора навигационных сигналов. Так, в фирме NAVSYS отказались использовать готовые дорогостоящие имитаторы навигационных сигналов от ведущих мировых производителей данного оборудования и создали свой имитатор, в котором встроили возможность воспроизведения записанных навигационных данных на аппаратном уровне [13].

Создание подобных сценариев работы имитатора, используя не математическую модель навигационных параметров, а данные, измеренные и записанные навигационной аппаратурой, мы приводим в данной работе. В качестве имитатора навигационных сигналов для проверки сформированных сценариев использовался имитатор, созданный НИИ радиотехники КГТУ.

В общем случае для моделирования сигнала НКА необходимо сформировать кадры, которые передаются в составе информационного сообщения и содержат эфемериды, альманах, состояние системы. Также необходимо сформировать задержку прихода сигнала, характеризующую удаленность НКА от потребителя и сдвиг несущей частоты, возникающий из-за сдвига частоты Доплера.

В данном методе для формирования информационных кадров НКА используются кадры, записанные с помощью навигационного приемника в точке с заранее известными координатами (рис. 1).



**Рис. 1. Запись цифровой информации с навигационного приемника для формирования сценариев работы имитатора**

Алгоритм работы навигационного процессора в основном может быть сведен к реализации стандартных полиномов вида

$$y_i(t) \Big|_{t_2}^{t_1} = a_{0i} + a_{1i}t + a_{2i}t^2 + \dots + a_{ni}t^n,$$

где  $a_{0i}, a_{1i}, \dots, a_{ni}$  - коэффициенты полинома;  $t_1, t_2$  - граничные условия.

Полином позволяет аппроксимировать траекторию движения НКА на определенный промежуток времени. Использование конкретного полинома зависит от аппаратной реализации имитатора навигационных сигналов. Выбор конкретной реализации полинома - компромиссное решение: с одной стороны, желательно как можно чаще обновлять полином, с другой – слишком частое обновление полинома подразумевает использование высокоскоростных каналов передачи данных между персональным компьютером и имитатором.

Для рассматриваемого имитатора навигационных сигналов решено было использовать полином третьей степени с частотой обновлений 30 секунд для обеспечения непрерывных измерений без потери сигнала в момент обновления полинома.

$$D(\Delta t) = D_0 + D_1\Delta t + D_2\Delta t^2 + D_3\Delta t^3,$$

где  $D_0, D_1, D_2, D_3$  - коэффициенты полинома,  $\Delta t$  - приращение времени с момента обновления полинома.

Каждый из коэффициентов имеет четко определенный физический смысл:  $D_0$  - расстояние между НКА и потребителем при  $\Delta t = 0$ ;  $D_1$  - величина, определяющая частоту Доплера

$$f_o = -\frac{D_1 f_L}{c},$$

где  $f_L$  - несущая частота,  $c$  – скорость света;

$D_2, D_3$  - величина, определяющая скорость изменения частоты Доплера;  $D_3$  - величина, определяющая ускорение изменения частоты Доплера.

На промежутке в 30 секунд с момента задания нового полинома значения псевдодальности, частоты Доплера и скорости изменения частоты Доплера вычисляются в соответствии с заданным полиномом непосредственно в имитаторе.

Зная точные координаты точки, в которой происходит запись цифровой информации и дальномерных измерений, можно, решив навигационную задачу с известными координатами, определить дальности до всех видимых НКА и с помощью имитатора аппроксимировать полиномом третьей степени уже значения полученных дальностей, а не псевдодальностей. Таким образом, в данном методе решение навигационной задачи нужно лишь для устранения ошибки определения дальности до НКА из-за конечной скорости распространения сигнала.

Для создания полинома третьей степени на 30-секундный интервал времени используется массив значений псевдодальностей, измеряемых каждую секунду. Решая навигационную задачу для каждого измерения, получаем массив значений дальностей для всех видимых НКА. Этот массив из 30 элементов для каждого НКА аппроксимировался классическим интерполяционным многочленом Лагранжа третьей степени [14]:

$$L_3(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3,$$

где:

$$\begin{aligned} a_0 &= -y_0 \frac{x_1x_2x_3}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)} + y_1 \frac{x_0x_2x_3}{(x_0-x_1)(x_1-x_2)(x_1-x_3)} - \\ &- y_2 \frac{x_0x_1x_3}{(x_0-x_2)(x_1-x_2)(x_2-x_3)} + y_3 \frac{x_0x_1x_2}{(x_0-x_3)(x_1-x_3)(x_2-x_3)}, \\ a_1 &= y_0 \frac{(x_1x_2+x_1x_3+x_2x_3)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)} - y_1 \frac{(x_0x_2+x_0x_3+x_2x_3)}{(x_0-x_1)(x_1-x_2)(x_1-x_3)} + \\ &+ y_2 \frac{(x_0x_1+x_0x_3+x_1x_3)}{(x_0-x_2)(x_1-x_2)(x_2-x_3)} - y_3 \frac{(x_0x_1+x_0x_2+x_1x_2)}{(x_0-x_3)(x_1-x_3)(x_2-x_3)}, \\ a_2 &= -y_0 \frac{(x_1+x_2+x_3)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)} + y_1 \frac{(x_0+x_2+x_3)}{(x_0-x_1)(x_1-x_2)(x_1-x_3)} - \\ &- y_2 \frac{(x_0+x_1+x_3)}{(x_0-x_2)(x_1-x_2)(x_2-x_3)} + y_3 \frac{(x_0+x_1+x_2)}{(x_0-x_3)(x_1-x_3)(x_2-x_3)}, \\ a_3 &= y_0 \frac{1}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)} - y_1 \frac{1}{(x_0-x_1)(x_1-x_2)(x_1-x_3)} + \\ &+ y_2 \frac{1}{(x_0-x_2)(x_1-x_2)(x_2-x_3)} - y_3 \frac{1}{(x_0-x_3)(x_1-x_3)(x_2-x_3)}. \end{aligned}$$

При использовании дальностей вместо псевдодальностей отпадает необходимость в коррекции часов приемника. Более того, если не избавиться от коэффициентов коррекции часов в записанных информационных кадрах, то при решении навигационной задачи это приведет к ухудшению точности определения координат потребителя, т.к. коррекция часов уже была проведена при размножении эфемерид, предшествующем расчету дальностей.

Коррекция часов НКА ГЛОНАСС осуществляется, исходя из параметров  $\gamma$  и  $\tau$  в оперативной информации [15]. В алгоритме размножения эфемерид НКА ГЛОНАСС данные коэффициенты влияют на поправки по частоте и псевдодальности.

Поправка по частоте

$$\Delta f = f_L \gamma,$$

где  $f_L$  - литерная частота НКА,  $\gamma$  - относительное отклонение несущей частоты.

Поправка по псевдодальности:

$$\Delta R = (\tau + \gamma t_k) c,$$

где  $\tau$  - сдвиг шкалы времени НКА,  $t_k$  – время на момент излучения.

Для имитации НКА GPS необходимо также исключить “мешающие” коэффициенты коррекции часов, которые передаются в первом подкадре оперативной информации НКА GPS.

Коррекция часов НКА GPS осуществляется, исходя из параметров  $a_{f_0}$ ,  $a_{f_1}$  и  $a_{f_2}$  в оперативной информации [16]. Так же, как и в алгоритме размножения эфемерид НКА ГЛОНАСС, в алгоритме размножения эфемерид GPS коэффициенты коррекции часов влияют на поправки по частоте и псевдодальности.

Поправка по частоте

$$\Delta f = (a_{f_1} + a_{f_2} \cdot t_k) \cdot f,$$

где  $f$  – частота сигнала,  $a_{f_1}$  и  $a_{f_2}$  – коэффициенты коррекции часов.

Поправка по псевдодальности

$$\Delta R = (a_{f_0} + a_{f_1} \cdot t_k + a_{f_2} \cdot \frac{t_k^2}{2}) \cdot c,$$

где  $a_{f_0}$  – коэффициент коррекции часов.

Алгоритм размножения эфемерид GPS учитывает также релятивистскую поправку псевдодальности

$$\Delta R^* = (Fe\sqrt{A} \sin(E_k)) \cdot c,$$

где  $A$  – большая полуось орбиты,  $E_k$  – эксцентрисическая аномалия,

$$F = -\frac{2\sqrt{\mu}}{c^2} = -4.442807633 \cdot 10^{-10} \frac{сек.}{\sqrt{м}}.$$

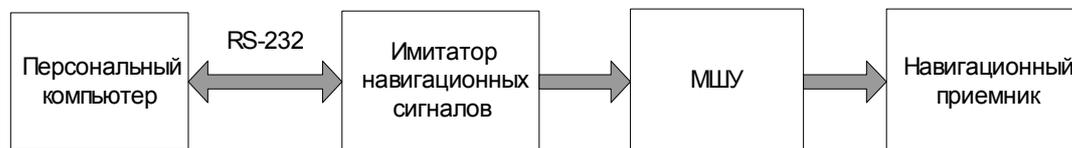
В данном методе, для исключения коррекции часов, производимой в навигационной аппаратуре, коэффициенты  $\gamma$  и  $\tau$ , входящие в состав оперативной информации ГЛОНАСС, и коэффициенты  $a_{f_0}$ ,  $a_{f_1}$  и  $a_{f_2}$ , входящие в состав оперативной информации GPS, принимаются равными нулю.

Следует отметить, что релятивистская поправка по псевдодальности, рассчитываемая в навигационном приемнике, в данном методе является лишней, т.к. с помощью имитатора формируются уже скорректированные значения дальностей приемника. Иными словами, в приемник закладываются истинные значения дальностей, аппроксимированные полиномом третьей степени на 30-секундный интервал времени. Если от поправки коррекции часов можно избавиться, приняв коэффициенты  $\gamma$  и  $\tau$  для оперативной информации ГЛОНАСС и  $a_{f_0}$ ,  $a_{f_1}$ ,  $a_{f_2}$  для оперативной информации GPS равными нулю, то избавиться от релятивистской поправки для псевдодальности НКА GPS затруднительно.

Зная, что навигационный приемник прибавит к значению рассчитанной псевдодальности релятивистскую поправку, перед аппроксимацией массива дальностей из 30 значений для НКА GPS из каждого значения вычитается значение данной поправки с тем расчетом, что в результате эта поправка компенсируется при размножении эфемерид в навигационной аппаратуре.

В этом случае полностью избавиться от “мешающей” релятивистской поправки можно, только если синхронизировать работу приемника и имитатора от одного кварцевого генератора.

Для работы со сценариями, созданными описанным способом, выход имитатора навигационных сигналов подсоединяется через МШУ к навигационному приемнику (рис. 2). Управление имитатором, а также обновление данных 1 раз в 30 секунд происходит по каналу RS-232 под операционной системой реального времени.



**Рис. 2. Использование созданных сценариев для воспроизведения созвездия НКА с помощью имитатора**

Испытания показали, что формирование навигационных сигналов четырех НКА с использованием заранее сформированных сценариев, позволяет навигационному приемнику определять координаты с погрешностью 10-20 м при геометрическом факторе меньше 4 как для четырех НКА GPS (рис. 3 А) так и для четырех НКА ГЛОНАСС (рис. 3 В).

Точность определения координат по подготовленным сценариям зависит, прежде всего, от точности определения координат при записи цифровой информации. Так, используемые приемники при записи данных для будущих сценариев определяли координаты с приблизительно такой же погрешностью (10-20 м).

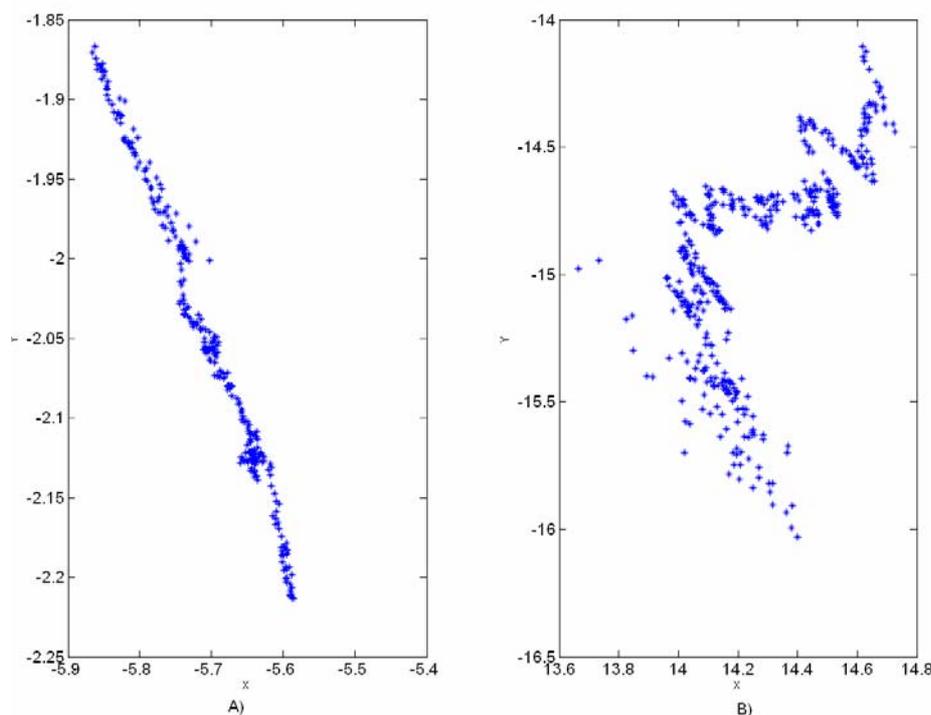


Рис. 3. Ошибка определения координат на плоскости для системы GPS (А) и системы ГЛОНАСС (В)

Использование данного метода позволило быстро создать сценарии работы из реальных навигационных данных для проверки способности имитатора формировать навигационные сигналы, по которым аппаратура навигации смогла решить навигационную задачу. Также возможно использование записанной навигационной ситуации в полевых условиях с помощью обычного навигационного приемника для последующего воспроизведения с целью проверки работы аппаратуры навигации. Следует отметить, что данный метод является простым и в то же время эффективным, позволяя создать работоспособные сценарии работы имитатора малыми затратами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jong-Hoon Won Design and test results of software based IF level GPS signal simulator / Jong-Hoon Won, Sun-Jun Ko, Ja-Sung Lee // ION GPS/GNSS. – 2004. – P. 305-315.
2. Анучин, О.Н. Бортовые системы навигации и ориентации искусственных спутников земли / О.Н. Анучин, И.Э. Комарова, Л.Ф. Порфирьев. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004. – С. 109-117.
3. Дишель, В.Д. Методы навигации и ориентации геостационарных и высокоэллиптических космических аппаратов при использовании БИНС, корректируемой по кодовым и фазовым измерениям ГЛОНАСС/GPS / В.Д. Дишель, В.Л. Паластин // X Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб., 2003. – С. 114-124.
4. Навигационное обеспечение международной космической станции / В.Н. Бранец, Е.А. Микрин, В.Н. Платонов и др. // X Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб., 2003. – С. 7-13.
5. Интегрированная навигационная аппаратура для низкоорбитальных космических аппаратов зондирования земли / Б.В. Шебшаевич, А.Е. Тюляков, В.Е. Дружинин и др. // X Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб., 2003. – С. 69-76.
6. Ислентьев, Е.В. Определение параметров орбит геостационарных космических аппаратов по сигналам навигационных систем ГЛОНАСС и GPS / Е.В. Ислентьев, А.К. Гречкосеев // Приборостроение. – 2004. – №4. – С. 5-9.
7. Ислентьев, Е.В. Моделирование навигационных космических аппаратов для потребителя на геостационарной орбите / Е.В. Ислентьев, В.И. Кокорин, А.А. Федоров // Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах. – 2005. – С. 206-209.
8. Кокорин, В.И. Параметры развития приложений ГЛОНАСС в КГТУ / Кокорин В.И., Федоров А.А. // Инновационное развитие регионов Сибири. – 2006. – С. 291-293.
9. Пат. 5093800 США, МКИ<sup>7</sup> G06G 7/78. Global positioning system satellite signal simulator / Saburo Ifune; заявитель и патентообладатель 675 Bonwit Pl., Simi Valley, Calif. 930065; заявл. 14.09.89; опубл. 3.03.92. – 8 р.

10. Пат. 11304900 Япония, МКИ<sup>7</sup> G01S 5/14. GPS simulator / Miyano Satoyuki; заявитель и патентообладатель Tokyo Shibaura electric Co.; опубл. 20.08.99. – 5 р.
11. Пат. 6825801 США, МКИ<sup>7</sup> H04B 7/185, H04B 17/00, G01R 31/00, H04L 1/00. Outer loop test generator for global positioning system / G.L. Coldiron, J.W. Dove; заявитель и патентообладатель The United States of America as represented by the Secretary of the Navy; заявл. 11.12.03; опубл. 30.11.04. – 21 р.
12. Донченко, С.И. Комплекс средств измерений для испытаний аппаратуры потребителей космических навигационных систем ГЛОНАСС и GPS / С.И. Донченко, О.В. Денисенко, В.М. Царев, В.П. Волченков // Новости навигации. - 2004. - №2. – С. 9-12.
13. Testing of Ultra-Tightly-Coupled GPS Operation Using a Precision GPS/Inertial Simulator / Alison Brown, Dien Nguyen, Yan Lu, Chaochao Wang. – Proceedings of ION GNSS 2005, Long Beach, CA, Sept. 2005.
14. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов / В.М. Вержбицкий. – М.: Высшая школа, 2002. – 840 с.
15. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. – М.: КНИЦ ВКС, 2002. – С. 28.
16. Interface Control Document: NAVSTAR GPS Space Segment / Navigation User Interfaces (ICD-GPS-200C). Rockwell Int. Corp. 1995. – С. 88.

### SYSTEM OF NAVIGATIONAL SATELLITES SIMULATION

**V.I. Kokorin, A.A. Fedorov**

*In this paper the mathematical model of navigational satellites GLONASS and GPS based on the recorded navigational data with the use of navigational equipment was examined. Using telemetric and digital information scripts for playback of navigational satellites constellation under control of navigational signal simulator were created. Applications for simulating of satellites navigation systems are a method for developing of hardware and software complexes to use in verification tasks of user equipments.*