

Разработка среды моделирования инерциальных навигационных систем

А.Н. Соловьев¹, А.В. Саблин², А.А. Лялинский¹

¹Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, soloviev.alexander@gmail.com

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ», alexsingular@gmail.com

Аннотация – Рассмотрены вопросы разработки среды моделирования инерциальных и интегрированных навигационных систем, позволяющей проводить оценку точностных характеристик разрабатываемых систем. Предложена структура предлагаемой среды моделирования. Представлена реализация основных компонентов данной среды. Рассмотрены варианты реализаций пользовательского интерфейса среды моделирования и основных режимов работы.

Ключевые слова - инерциальные навигационные системы, системы моделирования.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение в различных областях техники и промышленности получили инерциальные навигационные системы (ИНС), реализованные на основе распределенного множества полупроводниковых сенсоров (акселерометров и гироскопов), а также интегрированные навигационные системы (ИнтНС), выполненные на основе интеграции ИНС и глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS/GLONASS. При этом ИНС на основе показаний инерциальных сенсоров определяет угловые и линейные приращения за время наблюдения, имеющие монотонный характер роста погрешностей вследствие многократного интегрирования показаний сенсоров. Объединение ИНС с ГНСС в ИнтНС позволяет устранить монотонный рост погрешности и одновременно повысить динамику вычисления координат и угловых параметров объекта. В настоящее время зарубежной и отечественной промышленностью выпускается достаточно большой ассортимент ИНС и приемников ГНСС, из которых разработчик может достаточно быстро «собрать» ИнтНС с требуемыми габаритно-весовыми и стоимостными характеристиками. При этом одним из ключевых вопросов остается оценка точности полученной системы. Проведенный анализ показал отсутствие специальных «оболочек» и программных сред, позволяющих оперативно провести оценку точностных характеристик для выбранной конфигурации ИНС и ИнтНС. Данная статья посвящена разработке среды моделирования ИНС и ИнтНС, обеспечивающей получение оперативной оценки точностных характеристик инерциальных и навигационных систем. Оставшаяся часть статьи организована следующим

образом. В разделе II обсуждается структура предлагаемой среды моделирования. В разделе III представлена реализация основных компонентов этой среды. В разделе IV рассмотрены два варианта реализации основных режимов моделирования.

II. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СРЕДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

На основе анализа существующих подходов к проектированию навигационных систем [1] - [6] была разработана обобщенная структура среды параметрического моделирования и оценки точностных характеристик навигационных систем, (рис. 1). При этом под параметрическим проектированием подразумевается выбор одной из библиотечных (заложенных в «оболочку проектирования») моделей ИнтНС (например, интеграция безгироскопной ИНС и ГНСС) с ее последующей параметрической настройкой - выбором значений параметров заданной модели (например, выбором характеристик используемых инерциальных сенсоров – акселерометров и гироскопов, и характеристик используемого приемника ГНСС).

Начальным шагом, как уже было сказано выше, является выбор модели и параметров проектируемой ИнтНС. После этого осуществляется предварительная оценка точностных характеристик на основе полученных аналитических оценок, представленных ниже в разделе III. Если предварительная оценка точности не устраивает, то происходит коррекция выбранной модели и/или параметров модели (например, замена инерциальных сенсоров или типа приемника ГНСС). Если предварительная оценка точности устраивает, то осуществляется переход к более детальной оценке точностных характеристик на основе имитационного моделирования движения инерциальной системы по заданным эталонным траекториям, выбираемых разработчиком системы из набора библиотечных траекторий или формируемых индивидуально для заданной инерциальной системы. При этом в качестве входных сигналов используются идеальные показания сенсоров (вычисленные для движения объекта по выбранной эталонной траектории) с наложенными на них «шумовыми» составляющими, моделируемыми в виде суперпозиции

гауссовского распределения (высокочастотная составляющая) и Марковского процесса 1-ого рода (низкочастотная составляющая). Далее на основе полученных входных данных от инерциальных сенсоров осуществляется расчет параметров траектории движения объекта. Оценка погрешности моделируемой ИнтНС определяется как разница между эталонной и вычисленной траекториями. Если полученные точностные оценки для выбранной модели инерциальной системы не устраивают, то осуществляется выбор другой библиотечной модели (например, безгироскопная модель ИНС заменяется на гироскопную) и/или изменение параметров модели (например, смена сенсоров и/или ГНСС приемника). Итогом результатом моделирования является выбор параметров ИнтНС, при которых точностные характеристики разработанной системы удовлетворяют исходным требованиям. Более подробно реализация предложенной среды моделирования представлена ниже в разделах III и IV.

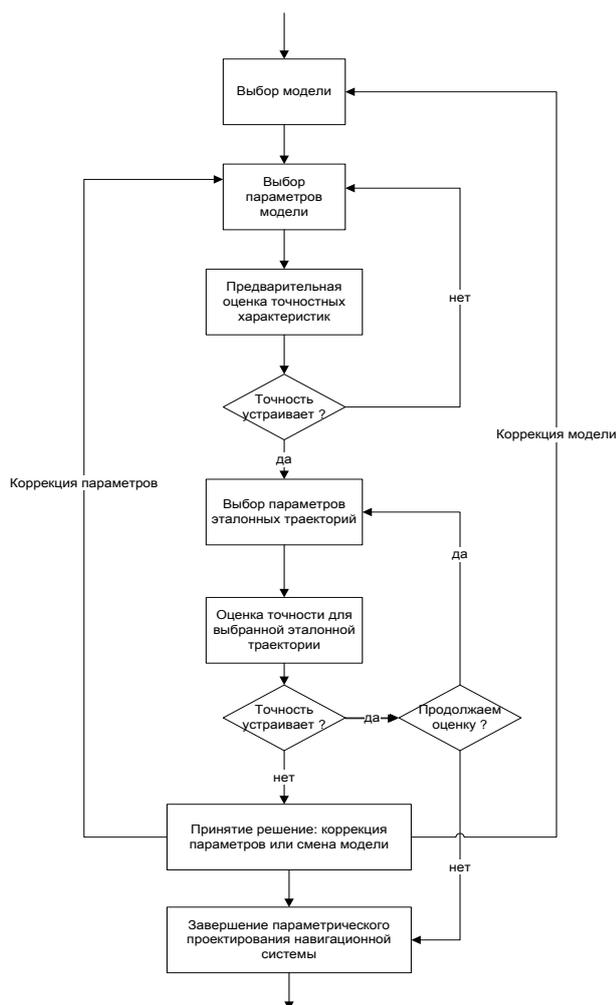


Рис. 1. Структурная схема среды параметрического проектирования ИнтНС

III. РЕАЛИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ СРЕДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В данном разделе представлено описание основных компонентов среды параметрического проектирования и моделирования, структура которой была описана выше в разделе II.

A. Аналитическая оценка погрешностей инерциальной системы

В соответствии со структурой (рис. 1) вначале проводится предварительный анализ точностных характеристик на основе полученных аналитических оценок. Ниже представлены аналитические оценки для ИНС, реализованных на основе «традиционного подхода» [5, 10] (с использованием гироскопов), а также на основе «альтернативного подхода» - реализации ИНС на основе распределенного множества акселерометров [10] (без использования гироскопов).

При этом используются следующие переменные:

- низкочастотные (bias) и высокочастотные (noise) шумы акселерометров ($b_{accel}, \sigma_{accel}$) и гироскопов (b_{gyro}, σ_{gyro}), соответственно;
- $t, \Delta t$ - время и дискрет моделирования, соответственно;
- σ_R, σ_α - среднеквадратическая погрешность определения линейных и угловых координат, соответственно;
- g - ускорение свободного падения.

Аналитическая оценка погрешностей безгироскопной ИНС

С учетом алгоритма расчета навигационных параметров, представленного в [10]:

- определение значений угловой скорости путем интегрирования значений углового ускорения дает следующую оценку погрешности:

$$\sigma_{gyro} = \frac{b_{accel}}{r} \cdot t + \frac{\sigma_{accel}}{r} \cdot \sqrt{t \cdot \Delta t},$$

где r - расстояние от центра системы координат до точки установки акселерометров [10];

- определение угловой ориентации путем интегрирования значений угловой скорости приводит к появлению следующей погрешности:

$$\sigma_\alpha = \frac{b_{accel}}{2r} \cdot t^2 + \frac{\sigma_{accel}}{r} \cdot \sqrt{\frac{t^3 \cdot \Delta t}{3}}.$$

- определение линейных ускорений, снимаемых с акселерометров, за счет компенсации вектора гравитации приводит к появлению следующей погрешности:

$$\sigma_G = g \cdot \sigma_\alpha$$

С учетом расчета координат путем двойного интегрирования значений линейных ускорений имеем:

$$\sigma_r(t) = \sigma_{b,r}(t) + \sigma_{noiser}(t),$$

где

$$\sigma_{b,r} = \frac{b_{accel} \cdot g \cdot t^4}{r \cdot 24} + \frac{b_{accel} \cdot t^2}{2};$$

$$\sigma_{noiser}(t) = \sqrt{\sigma_{1,R}^2 + \sigma_{2,R}^2}, \sigma_{1,R} = \sigma_{accel} \cdot \sqrt{\frac{t^3 \cdot \Delta t}{3}},$$

$$\sigma_{2,r} = g \cdot \frac{\sigma_{accel}}{r} \cdot \sqrt{\frac{t^7 \cdot \Delta t}{630}}$$

В итоге выражение для оценки погрешности шестисенсорной безгироскопной ИНС имеет следующий вид:

$$\sigma_r = b_{accel} \left(\frac{g \cdot t^4}{r \cdot 24} + \frac{t^2}{2} \right) + \sigma_{accel} \sqrt{\frac{t^3 \cdot \Delta t}{3} + \frac{g^2}{r^2} \cdot \frac{t^7 \cdot \Delta t}{630}}. \quad (1)$$

Аналитическая оценка погрешностей гироскопной системы

С учетом алгоритма реализации гироскопной ИНС, представленного в [3]-[6], имеем:

- погрешность определения значений угловой скорости путем интегрирования значений углового ускорения:

$$\sigma_{gyro} = \frac{b_{accel}}{r} \cdot t + \frac{\sigma_{accel}}{r} \cdot \sqrt{t \cdot \Delta t},$$

где r - расстояние от центра системы координат до точки установки акселерометров [10];

- погрешность определения угловой ориентации путем интегрирования значений угловой скорости:

$$\sigma_\alpha = \frac{b_{accel}}{2r} \cdot t^2 + \frac{\sigma_{accel}}{r} \cdot \sqrt{\frac{t^3 \cdot \Delta t}{3}};$$

- погрешность определения линейных ускорений, снимаемых с акселерометров, с учетом компенсации вектора гравитации:

$$\sigma_g = g \cdot \sigma_\alpha.$$

В итоге, с учетом расчета координат путем двойного интегрирования значений линейных ускорений, имеем итоговое выражение для оценки погрешности определения координат:

$$\sigma_R = b_{accel} \left(\frac{g t^3}{12wr} + \frac{t^2}{2} \right) + \sigma_{accel} \sqrt{\frac{t^3 \cdot \Delta t}{3} + \frac{g^2}{(2wr)^2} \cdot \frac{t^5 \cdot \Delta t}{30}}. \quad (2)$$

В. Формирование показаний «реальных» сенсоров на основе моделирования движения объекта по эталонной траектории

Начальной процедурой процесса моделирования является построение эталонных траекторий, на основе которых формируются показания инерциальных сенсоров. Ниже представлено выражение для расчета эталонной траектории, заданной в неподвижной системе координат (НСК):

$$\begin{aligned} R(t) &= R_0 + V_0 \cdot t + A \cdot t^2 + B \cdot \sin(C \cdot 2\pi + D) \\ w(t) &= a + b \cdot \sin(c \cdot 2\pi t + d) \end{aligned}, \quad (3)$$

где:

- $R(t), w(t)$ - координаты и угловая скорость эталонной траектории, соответственно;
- R_0, V_0 - начальные значения параметров эталонной траектории;
- A, B, C, D, a, b, c, d - параметры эталонной траектории, задаваемой пользователем.

Выражение (3) определяет значения ускорений (показания акселерометров с учетом компенсации вектора гравитации) и значения гироскопов, заданные в НСК. Для определения показаний сенсоров в связанной системе координат (ССК) необходимо вычисление значений матрицы координатных преобразований $C_{bN}(t_i)$, которая связывает показания сенсоров в НСК и ССК. С учетом [5] значение данной матрицы может быть определено с учетом $w(t)$, заданной выражением (3), следующим образом:

$$\begin{aligned} C_{bN}(t_i) &= C_{bN}(t_{i-1}) \cdot e^{\Omega(t_i) \cdot \Delta t_i}, \\ \Delta t_i &= t_i - t_{i-1}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{где } \Omega(t_i) = \begin{bmatrix} 0 & -w_z(t_i) & w_y(t_i) \\ w_z(t_i) & 0 & -w_x(t_i) \\ -w_y(t_i) & w_x(t_i) & 0 \end{bmatrix}.$$

В итоге на основе выражений (3) и (1) получаются значения показаний эталонных сенсоров (акселерометров и гироскопов) $\bar{A}_{accel,j}(t_i), \bar{w}_{gyro,k}(t_i)$ для случая движения объекта по заданной эталонной траектории.

Для учета влияния шумовых составляющих сенсоров к полученным идеальным значениям показаний сенсоров $\bar{A}_{accel,j}(t_i), \bar{w}_{gyro,k}(t_i)$ были добавлены следующие составляющие:

а) *высокочастотная шумовая составляющая*. Для реальных сенсоров (акселерометров и гироскопов) эта составляющая задается в спецификациях на конкретные типы сенсоров в виде среднеквадратичных погрешностей: $\sigma_{accel}, \sigma_{gyro}$,

соответственно. При этом её моделирование выполняется как:

$$randn(t_i) \cdot \sigma_{accel} \cdot randn(t_j) \cdot \sigma_{gyro} \quad (4)$$

где $randn$ – генератор случайных чисел на основе Гауссовского распределения;

б) *низкочастотная шумовая составляющая*. Для реальных сенсоров (акселерометров и гироскопов) основными параметрами являются:

- T_{accel}, T_{gyro} – корреляционное время для низкочастотной составляющей (bias) [5];

- var_{accel}, var_{gyro} – среднеквадратическое погрешность низкочастотной составляющей (bias) [5].

Моделирование данной составляющей выполняется с помощью Марковской модели 1-ого рода [5]:

$$bias_{accel}(t_i) = bias_{accel}(t_{i-1}) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{T_{accel}}} + \sqrt{var_{accel} \cdot (1 - e^{-\frac{2\Delta t}{T_{accel}}})} \cdot randn \quad (5)$$

$$bias_{gyro}(t_i) = bias_{gyro}(t_{i-1}) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{T_{gyro}}} + \sqrt{var_{gyro} \cdot (1 - e^{-\frac{2\Delta t}{T_{gyro}}})} \cdot randn$$

Типовой вид суммарных шумовых составляющих, полученных с учетом (4)-(5), представлен на рис. 2.

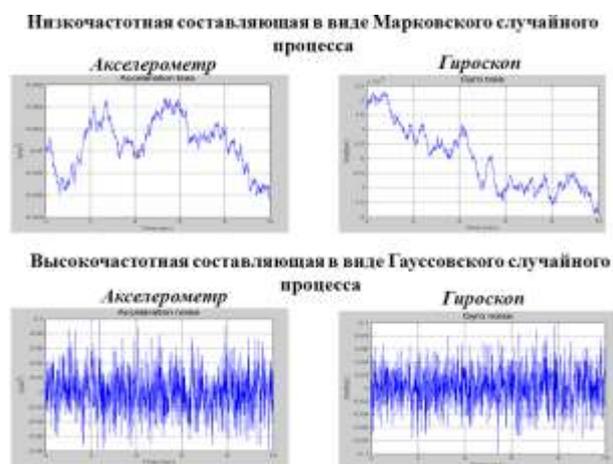


Рис. 2. Типовой вид шумовых составляющих инерциальных сенсоров

В итоге были получены показания «реальных сенсоров» для случая движения объекта по заданной эталонной траектории.

С. Моделирование и расчет траектории движения

На основе показаний «реальных сенсоров» предлагаемая среда осуществляет моделирование реальных значений траектории движения объекта с учетом выбранной модели ИнтНС. На рис. 3 представлен типовой вид результатов моделирования, полученных на основе показаний «реальных» сенсоров для выбранной эталонной траектории.

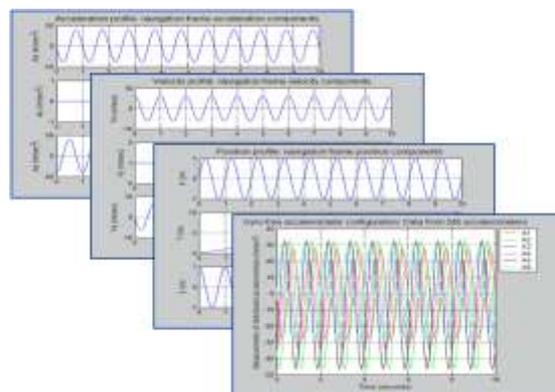


Рис. 3. Типовой вид траектории движения, вычисленной на основе показаний «реальных» сенсоров

Д. Оценка точностных характеристик навигационных систем

Оценка полученных точностных характеристик осуществляется путем сравнения эталонных траекторий с траекториями, рассчитанными на основе смоделированных показаний сенсоров. На рис. 4 представлен типовой пример расчета погрешностей моделирования путем сравнения эталонной и смоделированной траекторий.

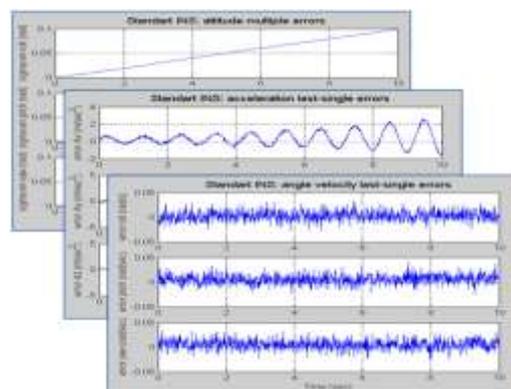


Рис. 4. Типовой вид погрешностей расчета параметров ИнтНС и траектории движения объекта

IV. ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ СРЕДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Были разработаны два варианта среды моделирования: локальная (приложение для Windows-среды) и в виде веб-сайта (с доступом из Интернет). В основе обеих реализаций лежит единая математическая модель ИНС, основные отличия – в типе пользовательского интерфейса и в возможных вариантах доступа пользователей.

А. Локальная реализация среды проектирования

На рис. 5 показана корневая панель локальной среды проектирования, с помощью которой происходит выбор желаемой модели построения ИнтНС. Из этой панели осуществляется как вызов процедуры формирования эталонных траекторий, так и выбор требуемой модели ИнтНС.

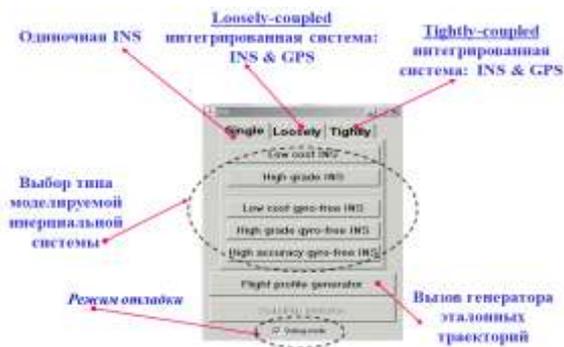


Рис. 5. Корневая панель среды моделирования

На рис. 6 показана панель параметризации, с помощью которой осуществляется задание параметров используемых сенсоров. Параметры сенсоров могут быть выбраны как из библиотеки стандартных ИНС, так и заданы произвольным образом.

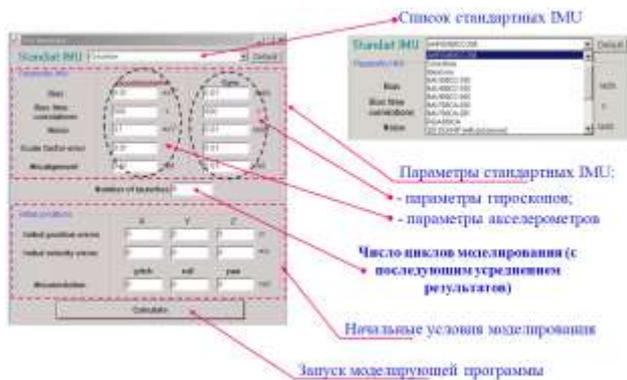


Рис. 6. Панель параметризации

На рис. 7 представлено задание параметров эталонных траекторий, формируемых в соответствии с (3).



Рис. 7. Панель для задания параметров эталонных траекторий

На рис. 8 представлена панель режимов моделирования ИНС с учетом задания начальных условий моделирования.

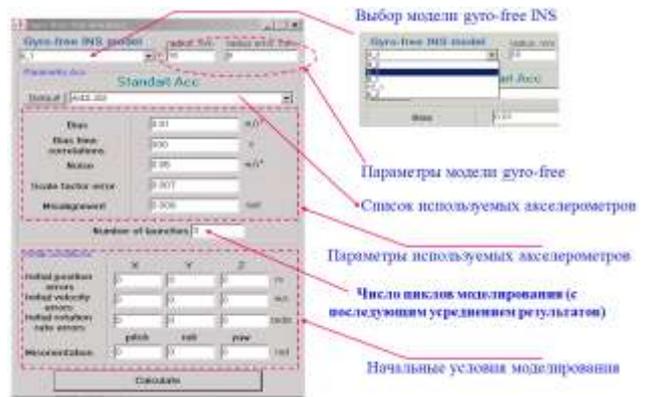


Рис. 8. Задание режимов моделирования ИНС

На рис. 9 представлена панель моделирования ИнтНС.

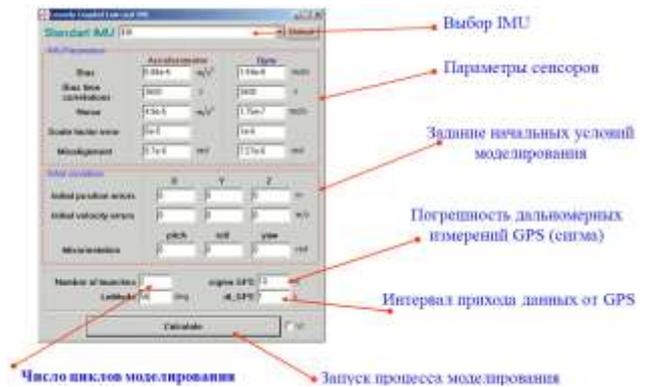


Рис. 9. Задание параметров GPS/GLONASS

На рис. 10 представлен пример работы среды моделирования.

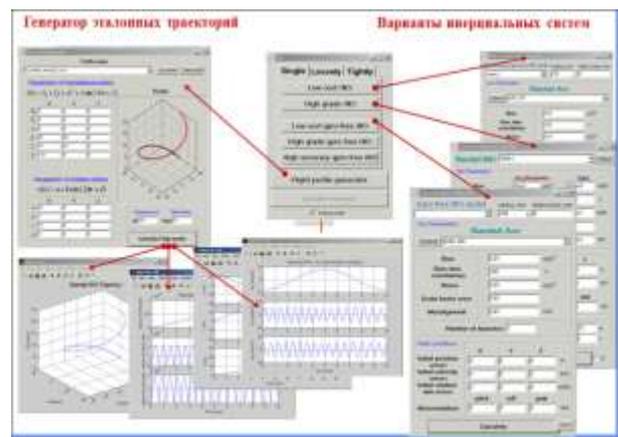


Рис. 10. Результаты моделирования

В. Реализация среды проектирования в виде веб-сайта

Поскольку в основе реализации лежит единая математическая модель, приведем только основные отличия данной реализации от локальной. Основное отличие – способ доступа к системе. Веб-сайт может быть вызван из любой точки доступа к Интернету,

локальный вариант работает только на том компьютере, где он развернут. Локальный вариант работает чуть быстрее, так как нет пересылки данных между локальным компьютером и сервером, на котором развернут сайт. Кроме того имеются отличия в панели ввода исходных данных, обусловленные использованием разных аппаратов (ввод исходных данных с помощью Матлаб-скриптов и ввод данных через веб-формы). Более существенным является ограничение на длительность моделирования: для локальной версии оно определяется только ресурсами локальной машины, для веб-сайта – не более минуты (максимально допустимое время ожидания отклика от веб-сервера).

На рис.11 представлена центральная панель выбора режимов моделирования, на рис. 12 – траектория моделирования.



Рис. 11. Панель выбора режима моделирования на веб-сайта ИНС

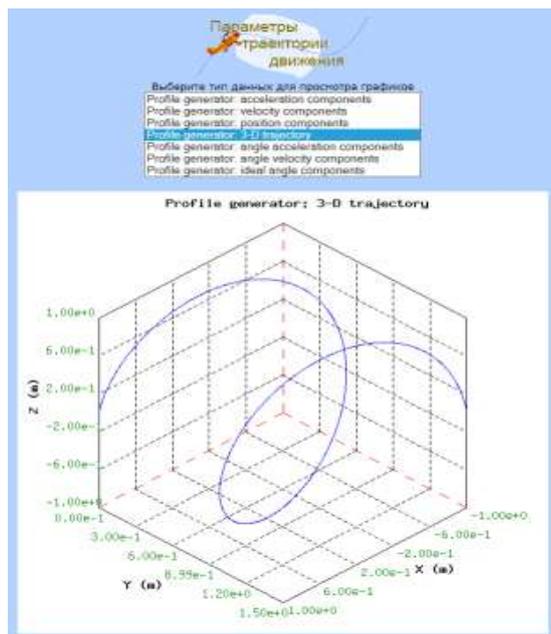


Рис. 12. Траектория, выбранная для моделирования

На рис. 13 представлен пример результатов моделирования.

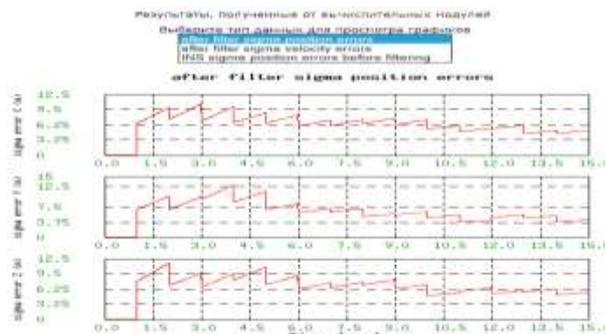


Рис. 13. Результаты моделирования

Версия веб-сайта среды моделирования ИНС доступна по адресу: <http://www.iprm.ru/ins/>.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная статья посвящена разработке среды параметрического проектирования и верификации ИНС и ИнтНС, которая позволяет оперативно проводить оценку точностных характеристик собранных навигационных систем.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Krishnan V. Measurement of Angular Velocity and Linear Acceleration Using Linear Accelerometers // Journal of the Franklin Institute. Oct. 1965. 280:4.
- [2] Merhav S.J. A Nongyroscopic Inertial Measurement Unit // J. Guidance. May-June 1982. Vol. 5. № 3.
- [3] Klass P.J. Inertial Sensor Utilizes Coriolis Effect // Aviation Week and Space Technology. Oct. 1983. № 10.
- [4] Norling B. Accelerometers: Current and Emerging Technology // Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Surveying and Remote Sensing. Symposium No. 107. Banff, Alberta, Canada. September 10-13, 1990.
- [5] Merhav S. Aerospace Sensor Systems and Applications. Springer-Verlag. New York, 1996. (Chap. 6, Coriolis Angular Rate Sensors).
- [6] Sun G. and Gu Q. Accelerometer Based North Finding System // IEEE Position, Location, and Navigation Symposium (PLANS). March 2000.
- [7] Soloviev A., Gunawardena S., Van Graas F. Mitigation of GPS Cross-Correlation Errors using Semi-Codeless Tracking // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. January 2012. Vol. 4. № 1.
- [8] Soloviev A., Dickman J. Extending GPS carrier phase availability indoors with a deeply integrated receiver architecture // IEEE Wireless Communication. 2011. Vol. 18. № 2.
- [9] Soloviev A. Tight Coupling of GPS, Laser Scanner, and Inertial Measurements for Navigation in Urban Environments // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. October 2010. Vol. 46. № 4.
- [10] Соловьев А.Н., Алексеев В.Е., Саблин А.В. Построение навигационной инерциальной системы на основе распределенного множества полупроводниковых акселерометров // Известия ВУЗов. Электроника. 2012. № 4 (96). С. 72-79.