

Программная модель устройств предварительной обработки радионавигационных систем траекторных измерений

В. С. Бахолдин, Д. А. Леконцев, А. А. Горбунов

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

vka@mil.ru

Аннотация. Рассмотрена программная модель устройств предварительной обработки радионавигационных систем траекторных измерений. Приведены интерфейс программы и результаты моделирования в MATLAB траектории, зон радиовидимости космических аппаратов и интервалов анализируемых наблюдений в зависимости от параметров, определяющих режим обработки. Выполнено исследование полиномиального усреднения, используемого при сглаживании и сжатии измерений наиболее общим методом.

Ключевые слова: радионавигационная система, предварительная обработка, траекторное измерение

I. ВВЕДЕНИЕ

Предварительная обработка траекторных измерений (ТИ) в радионавигационных системах (РНС) выполняется входящим в ее состав устройством предварительной обработки (УПО). УПО реализуется с использованием универсальных вычислительных средств или представляет собой специализированное цифровое вычислительное устройство, работающее по жесткой программе. Применительно к системам космических ТИ использование универсальных вычислительных средств является предпочтительным вариантом, так как позволяет реализовать гибкие алгоритмы обработки, в зависимости от параметров траектории космического аппарата.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ ТИ

Наиболее сложными и трудоемкими задачами предварительной обработки являются преобразование результатов навигационных измерений в цифровую форму, их статистическое сглаживание и сжатие, а также временная привязка результатов предварительной обработки. При сглаживании и сжатии результатов ТИ наиболее широкое распространение в УПО получило полиномиальное усреднение, а также линейное, являющееся его частным случаем при нулевой степени аппроксимирующего полинома.

Таким образом, при создании перспективных и модернизации существующих средств ТИ важным этапом является разработка алгоритмов предварительной обработки и выбор их параметров, обеспечивающих оптимальный режим обработки для заданной траектории объекта. В качестве критерия эффективности используют суммарную погрешность результатов

предварительной обработки на интервале усреднения $[t_H, t_K]$, привязанных к моменту времени $t_i \in [t_H, t_K]$:

$$E_i^2 = \Delta_i^2 + \sigma_i^2,$$

где σ_i^2 – дисперсия ошибки оценивания измеряемого параметра в этот момент времени, а $\Delta_i = r(t_i) - \hat{r}(t_i)$ – динамическая ошибка, определяемая как разность между истинным значением параметра и значением аппроксимирующей функции в i -й момент времени.

При полиномиальном сглаживании измеряемый параметр $r(t)$ на интервале усреднения $[t_H, t_K]$ представляется в виде полинома, степень которого определяется принятой моделью траектории движения объекта

$$r(t) = r(t, \alpha) = \alpha_0 + \alpha_1(t - t_0) + \alpha_2 \frac{(t - t_0)^2}{2!} + \dots + \alpha_m \frac{(t - t_0)^m}{m!} = \sum_{j=0}^m \alpha_j \frac{s^j}{j!},$$

где s – относительное время, отсчитываемое от момента t_0 , лежащего внутри интервала $[t_H, t_K]$, $t_H \leq t_0 \leq t_K$, $s = t - t_0$; $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$ – коэффициенты полинома, имеющие соответственно смысл начального значения навигационного параметра $\alpha_0 = r(t_0)$, начального значения скорости изменения параметра во времени (его первой производной) $\alpha_1 = \left. \frac{dr(t)}{dt} \right|_{t=t_0}$, начального значения ускорения (второй производной) $\alpha_2 = \left. \frac{d^2r(t)}{dt^2} \right|_{t=t_0}$ и т. д. в момент времени $t = t_0$. Из

приведенного выражения следует, что функция $r(t)$ на интервале $[t_H, t_K]$ будет задана полностью, если будут известны коэффициенты α_j . Исходной информацией для определения коэффициентов α_j является выборка из N измерений r_i^* функции $r(t)$, произведенных на интервале $[t_H, t_K]$ в дискретные моменты времени t_i с шагом $T = t_{i+1} - t_i$, с погрешностями δr_i .

Наиболее общим методом решения поставленной задачи сглаживания и сжатия является метод максимального правдоподобия (ММП), обеспечивающий минимум дисперсии ошибок

оценивания коэффициентов a_j . Однако из-за сложности реализации ММП широкое распространение в УПО получил более простой метод наименьших квадратов (МНК), являющийся частным случаем ММП при допущении о равноточности измерений, т. е. при $\sigma_{\delta r_i}^2 = \sigma_{\delta r}^2 = \text{const}$, и некоррелированности ошибок измерений в различные моменты времени t_i . Последнее условие может быть обеспечено при выборе шага T больше интервала корреляции ошибок δr_i . Суть МНК при полиномиальном усреднении состоит в том, что в этом случае в качестве оценок коэффициентов аппроксимирующего полинома \hat{a}_j выбираются такие их значения, которые обеспечивают минимум суммы квадратов отклонений в каждый момент времени t_i на интервале $[t_H, t_K]$ аппроксимирующей функции $\hat{r}(t_i)$ от измерений $r^*(t_i)$, т. е. выполнение условия
$$\sum_{i=1}^N (r_i^* - r_i)^2 = \min.$$
 Таким образом в качестве параметров, определяющих режим обработки выступают степень полинома m , шаг измерений T , объем выборки N и момент привязки t_0 .

III. ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

Разработанная программная модель УПО обеспечивает исследование влияния параметров обработки на результирующее значение ошибки E . В качестве среды разработки использован пакет математических и инженерных вычислений MATLAB. Демонстрационные и интуитивно понятные окна программы реализованы с помощью инструмента GUI Layout Editor в графическом интерфейсе пользователя graphical user interfaces (GUI) MATLAB. После запуска исполняемого модуля модели УПО на экране персонального компьютера отображается экранная форма, приведенная на рис. 1. В качестве исходных данных, определяющих орбиту космического аппарата (КА) и значения измеренных ТНП, задаются высота орбиты в километрах, эксцентриситет, аргумент широты перигея и минимальный угол зоны видимости, среднеквадратические отклонения измерений дальности в метрах и скорости в метрах в секунду. В процессе ввода данных в левой части экранной формы осуществляется контроль их номинальных значений в допустимом диапазоне и в случае выхода за пределы этого диапазона выдается сообщение об ошибке.

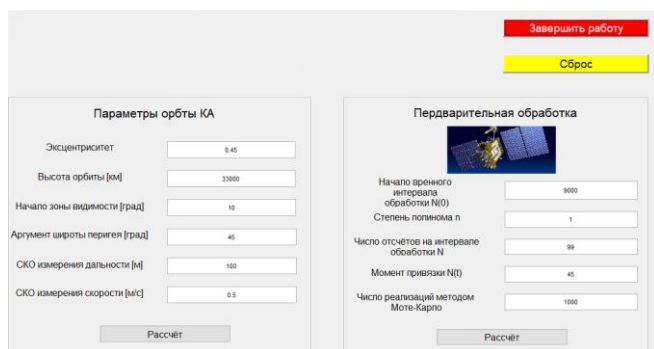


Рис. 1. Окно ввода исходных данных и параметров предварительной обработки измерений ТНП

После нажатия кнопки «Расчет» выполняется моделирование измерений дальности и радиальной скорости, которые затем отображаются в графиках следующей экранной формы, приведенной на рис. 2. Используя полученные результаты, можно выбрать начало участка траектории движения КА в пределах зоны видимости, на которой измеряемый параметр изменяется по наиболее сложному закону, и для которого следует определить параметры обработки, обеспечивающие наилучшие результаты. Ввод параметров предварительной обработки осуществляется в правой части первой экранной формы.

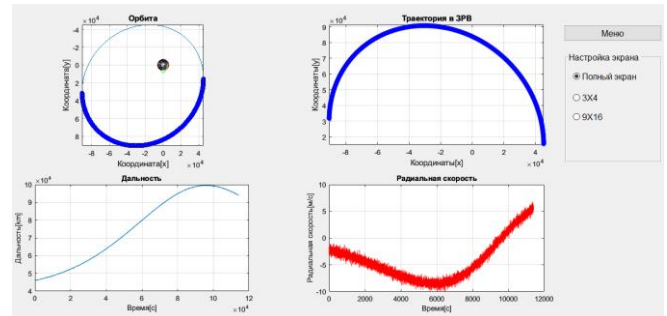


Рис. 2. Окно вывода результатов моделирования дальности и радиальной скорости в пределах зоны видимости наземного средства измерения ТНП

После нажатия кнопки «Расчет» выполняется предварительная обработка результатов измерения на пяти последовательных интервалах усреднения длительность которых определяется введенным значением числа отсчетов в выборке. Шаг поступления измерений дальности и радиальной скорости в модели постоянный и выбран равным одной секунде. Результаты обработки отображаются на экранной форме, приведенной на рис. 3. В качестве результатов отображаются графики, иллюстрирующие измерения дальности и скорости, а также аппроксимирующей функции на каждом из пяти интервалов обработки. Возврат к оконной форме с исходными данными осуществляется с использованием кнопки меню.

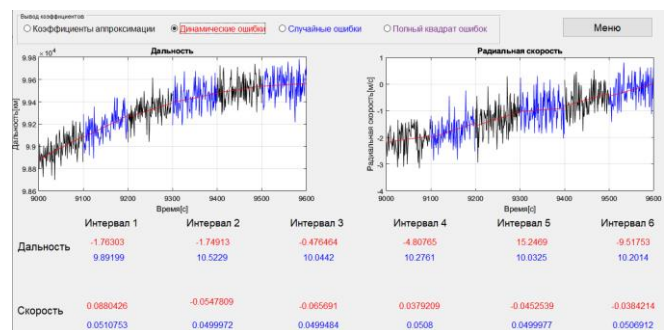


Рис. 3. Окно вывода результатов предварительной обработки измерений дальности и радиальной скорости

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программная модель УПО РНС позволяет исследовать эффективность функционирования устройств предварительной обработки радионавигационных систем траекторных измерений. Разработанная модель может быть использована как при проведении научных исследований, так и в учебном

процессе для закрепления и углубления знаний полученных при изучении основ построения радионавигационных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Колесников Б.Г., Маслов М.М. Основы теории радиотехнических методов, измерения параметров движения: Учебное пособие. МО СССР, 1984 г. 424 с.
- [2] Основы радионавигационных измерений / В.А. Губин, Н.Ф. Клоев, А.А. Костылев, Б.Г. Мельников, М.Г. Степанов, Е.А. Ткачев / Под. ред. Н.Ф. Клоева – МО СССР, 1987. 429 с.
- [3] Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 1104 с.