

МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

к.т.н. М.Ф. Белянский
(представил д.т.н. проф. А.И. Погорелов)

Рассматривается методика количественной оценки систематических и случайных ошибок измерений и использование этих оценок для проверки гипотезы о значимости отличия ошибок измерений испытываемой и эталонной измерительных систем.

Известно [1], что в результатах измерений z некоторого параметра u принципиально могут содержаться ошибки трех видов: сингулярные (систематические или сильно коррелированные), регулярные (случайные или слабо коррелированные) и грубые, связанные, в основном, с резким нарушением условий работы измерительного средства. Если сингулярные ошибки можно полагать постоянными или медленно меняющимися в конкретном сеансе измерений и случайными на множестве сеансов измерений, то регулярные ошибки являются случайными как в каждом, так и на множестве сеансов измерений. Причем математическое ожидание этих ошибок полагается равным нулю.

Поскольку указанные ошибки могут быть разными для различных измерительных систем и существенным образом влияют на точность оценок, получаемых в результате решения измерительной задачи, то возникает необходимость не только в оценивании этих ошибок, но и в проведении сравнительного анализа указанных ошибок для различных измерительных систем (ИС). Последняя задача становится особенно актуальной, если осуществляется передача управления некоторым летательным аппаратам (ЛА) от одного комплекса управления к другому. Такая задача, например, возникла при передаче управления КА "Січ - 1" от командно - измерительного комплекса России к наземному автоматизированному комплексу управления КА Украины.

© к.т.н. М.Ф. Белянский, 1998

Указанный сравнительный анализ проводится отдельно для сингулярной и регулярной ошибок. При этом одна из названных ИС используется как эталонная, а другая как испытываемая.

Количественная оценка сингулярных ошибок измерений испытываемой ИС параметра y проводится относительно эталонной или расчетной траектории ЛА, которая строится по результатам измерений эталонной ИС. После этого для эталонной траектории в моменты времени t_i , проведенных измерительных испытаний ИС, определяются расчетные значения измеряемого параметра y_{pi} и формируется вектор Δz_i отклонений результатов измерений z_i от расчетных значений измеряемого параметра, т.е.

$$\Delta \bar{z} = \left[(z_1 - y_{p1}) \mathbf{K} (z_N - y_{pN}) \right]^T.$$

При этом предполагается, что случайные ошибки y вектора $\Delta \bar{z}$ такие же как и y вектора $\bar{z} = [z_1, \mathbf{K}, z_N]^T$. В первом приближении полагается, что систематическая ошибка измерений в моменты времени $t_i (i = \overline{1, N})$, равна Δz_i и представляется суммой

$$\Delta z_i = \Delta z_0 + \dot{y}_{pi} \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где Δz_0 - постоянная составляющая,

\dot{y}_{pi} - производная от измеряемого параметра по времени,

Δt - неточность привязки результатов измерений по времени.

После этого по методу наименьших квадратов оцениваются неизвестные величины Δz_0 и Δt . Найденные таким образом значения Δz_0 , в зависимости от используемого вектора \bar{z} , полученного либо с помощью эталонной, либо с помощью испытываемой ИС, используются для формирования выборки

$$\Delta \bar{y} = \left[(\Delta z_{01}^3 - \Delta z_{01}^n) \mathbf{K} (\Delta z_{0m}^3 - \Delta z_{0m}^n) \right]^T,$$

где $\Delta z_{0j}^3, \Delta z_{0j}^n$ - значения величины Δz_0 в j -ом сеансе измерений ($j = \overline{1, m}$), полученной соответственно для эталонной и испытываемой ИС.

Рассматривая величины $\Delta y_j = \Delta z_{0j}^3 - \Delta z_{0j}^n$ как реализации случайной величины Δy , определяются оценки математического ожидания $m_{\Delta y}$ и дисперсии $\sigma_{\Delta y}^2$ этой величины. Качество полученных оценок характеризуется соответственными доверительными интервалами, построенными с использованием t и χ^2 - распределений.

Далее на основе статистической проверки гипотезы о точности решения задачи оценивания по измерениям испытываемой и эталонной ИС делается вывод о соответствии или несоответствии точности измерений требованиям. Проверка гипотезы о точности решения задачи оценивания проводится путем сопоставления ошибок прогнозов параметров движения ЛА, найденных по результатам измерений на предыдущем мерном интервале по различным выборкам измерений, полученным с помощью испытываемой и эталонной ИС.

При этом отличия в точности прогнозирования положения центра масс ЛА, определяемые в каждом сеансе измерений при решении задачи оценивания по измерениям эталонной и испытываемой ИС, позволяют сделать вывод о соотношениях систематических ошибок указанных ИС.

В качестве показателя точности прогноза КА предлагается использовать величину

$$\Delta r = \sqrt{\Delta l^2 + \Delta n^2 + \Delta b^2},$$

где $\Delta n = \Delta R_3$;

$$\Delta b = R_3 \cdot \Delta \Omega \cdot \sin i; \quad \Delta l = V_3 \cdot \Delta t_3;$$

R_3 - уточненный радиус-вектор КА на момент t_3 ;

t_3 - уточненное время выхода КА на экватор;

V_3 - уточненный модуль орбитальной скорости КА на момент t_3 ;

Ω - долгота восходящего узла КА;

$\Delta R_3, \Delta \Omega, \Delta t_3$ - модули отклонения уточненных параметров от их прогнозируемых значений.

После проверки указанной выше гипотезы осуществляется интерпретация полученных оценок $\hat{m}_{\Delta y}$ относительно известных (паспортных) величин систематических погрешностей измерений параметра у эталонной ИС.

Поскольку паспортные точностные характеристики эталонной ИС могут не соответствовать ее реальным точностным возможностям, то с целью проверки достоверности полученных выводов определяются

безотносительные количественные оценки точностных характеристик ИС. Для этого находится оценка систематической (сингулярной) ошибки измерений параметра у испытываемой ИС по всей совокупности сеансов измерений. Качество полученной оценки систематических погрешностей измерений характеризуется доверительным интервалом, построенным для заданной доверительной вероятности в соответствии с распределением Стьюдента.

Далее определяются оценки регулярной (случайной) ошибки измерений испытываемой ИС для каждого сеанса измерений. В качестве этих оценок используются оценки средних квадратических отклонений измерений параметра у некоторых аппроксимирующих функций, в качестве которых используются ортогональные полиномы Чебышева. Расчет искомых оценок осуществляется в процессе итерационной процедуры выбора степени аппроксимирующего полинома. При этом полиномами Чебышева аппроксимируются значения отклонений $\Delta z(t)$ результатов измерений от расчетных значений измеряемых параметров. После этого определяются оценки математического ожидания и дисперсии найденных оценок на множестве сеансов измерений. Эти оценки позволяют сделать вывод о случайной составляющей ошибок измерений испытываемой ИС и ее сопоставление с величиной указанной ошибки измерений эталонной ИС.

Углубленный анализ соотношения рассматриваемых случайных величин может быть осуществлен на основе описанной выше процедуры статистической проверки гипотез.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брандин В.Н., Васильев А.А., Худяков С.Г. Основы экспериментальной космической баллистики. - М.: Машиностроение, 1974. - 340 с.
-