УДК 389.14

О.М. ПАПЧЕНКО

Национальный транспортный университет, Украина

ОЦЕНКА СУММАРНОЙ ОШИБКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

Исследованы характеристики датчиков как линейных систем и проанализированы погрешности измерений на основе модели измерительного канала. Для однозначности восстановления входного сигнала необходимо иметь априорную информацию, которая позволит ограничить класс возможных функций и её целесообразно использовать для устранения неопределенности решения.

летные испытания, измерительный канал, линейная система, погрешность измерения, апостериорная информация, восстановление сигнала, однозначность решения, повышение точности

Введение

Надежность оценки характеристик летательных аппаратов (ЛА) зависит от качества работы измерительной системы.

Физической сущностью измерительного преобразования является преобразование и передача энергии, в частности преобразование одного вида энергии в другой. В процессе преобразований входной сигнал претерпевает различного рода искажения, вносимые реальными приборами.

1. Формулирование проблемы

Эффективным способом устранения искажений является аналитическое восстановление сигнала, т.е. апостериорный способ устранения искажений.

Под восстановлением сигнала понимается такая обработка отклика на выходе измерительного канала, которая позволяет получить наиболее близкую (по определенному критерию) функцию к входному сигналу. При этом реальные явления, вызывающие искажения, заменяются их математической моделью (ММ).

Общие соотношения. В соответствии с принятой в математической физике терминологией процесс определения отклика $y(t)$ по информации о входном сигнале $x(t)$ составляет содержание прямой задачи. Основной закон функционирования рассматриваемых систем выражается дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами

$$y(t) = a_0 + a_1 \dot{x}(t) + ... + a_n x^{(n)}(t) .$$

Основное интегральное уравнение является уравнением типа свертки. Интеграл свертки, который является основой для решения многих практических задач, можно выразить в двух формах:

$$y(t) = \int_0^t x(\tau) h(t-\tau) d\tau \ \text{ или } \ y(t) = \int_0^t h(\tau) x(t-\tau) d\tau , \quad (1)$$

где $h(\tau)$ – импульсная характеристика звена.

Интеграл свертки часто удобно представлять в виде интеграла Дюамеля через переходную характеристику звена $h_1(t)$: $h_1(t) = \int h(t) dt$.

2. Решение проблемы. Измерительный канал

В случае анализа характеристик ЛА по результатам измерений интерес представляет задача восстановления сигнала по информации об отклике, т.е. обратная задача. При решении обратных задач возникают следующие вопросы: существует ли решение основного интегрального уравнения, является ли оно единственным, устойчиво ли решение (т.е. приводят ли малые изменения исходных данных к малым изменениям решения). Существование решения зависит от того, к каким классам функций по сути задачи относятся сигнал и отклик.

В практических задачах восстановления сигналов должна быть уверенность в существовании функции $x(\tau)$, стоящей под интегралом в уравнении свертки (1). Отсутствие решения в таких задачах может объясняться лишь неадекватностью ММ реальному функционированию систем. Для однозначности восстановления входного сигнала необходимы принципы отбора, основанные на дополнительной априорной информации о сигнале, которая позволит как-то ограничить класс возможных функций и которую можно использовать для устранения неоднозначности решения.

При проведении экспериментальных исследований ошибки измерения неизбежны и вместо уравнения (1) с точно известной левой частью приходится решать уравнение с приближенной левой частью, известной с некоторой точностью. Сколь угодно малая погрешность в определении левой части уравнения может привести к большой ошибке в решении.

Если в практических задачах восстановления сигналов мы обычно уверены в существовании решения основного интегрального уравнения (причем единственность решения часто тоже может присутствовать), то неустойчивость решения является неотъемлемым свойством таких задач, делающим их некорректно поставленными. Решать их трудно из-за неизбежных ошибок регистрации наблюдаемого отклика.

Под измерительным каналом (ИК) понимается последовательная цепь измерительных преобразователей (ИП) – устройств, в которых реализуется с известной точностью однозначная функциональная связь между двумя физическими величинами: сигналом и откликом (рис. 1).

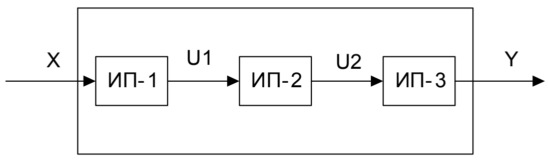

Рис. 1. Блок-схема измерительного канала

В состав ИК входят: ИП-1 – датчик, осуществляющий преобразование измеряемого физического параметра *X* в сигнал U1, пригодный для передачи и сохранения измерительной информации (например, напряжение или ток); ИП-2 – согласующее устройство (СУ), выполняющее непрерывное преобразование сигнала U1 в сигнал U2 (масштабирование, приведение к стандартной номенклатуре аналоговых сигналов и т.п.); ИП-3 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП), осуществляющий квантование аналогового сигнала по уровню и дискретизацию по времени [1].

2.1. Линейная модель измерительного канала

В общем случае при анализе погрешности данных, снимаемых с выхода ИК, его следует описывать моделью в виде нелинейной динамической системы. Нелинейность модели обуславливается, в частности, наличием в тракте ИК такого типично нелинейного элемента как АЦП (ИП-3). Выполняемое в тракте ИК нелинейное преобразование аналогового сигнала U2 при его квантовании и дискретизации по времени можно рассматривать эквивалентным влиянию некоторой помехи ξ. Точка приложения этой помехи соответствует месту включения ИП-3 в тракт ИК, а вероятностные характеристики аналогичны характеристикам нелинейных искажений, вносимых в сигнал U2 нелинейным преобразователем ИП-3.

Погрешность аналого-цифрового преобразователя [2] при достаточно общих предположениях о характеристиках сигнала U2 описывается моделью в виде некоррелируемого стационарного процесса с одномерной плотностью вероятности, соответствующей равномерному закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $(\sigma_\xi)^2 = (\Delta_U)^2/12$, где Δ_U – шаг квантования сигнала U2 по уровню. Следовательно, если нелинейные свойства тракта ИК обусловлены только наличием операции квантования сигнала по уровню и его дискретизации по времени, нелинейную часть тракта ИК оказывается возможным представить линейной моделью с аддитивно приложенной помехой ξ.

Учитывая, что инерционность электронных преобразователей, каковыми по конструктивному исполнению являются ИП-2 и ИП-3, пренебрежительно мала по сравнению с инерционностью электромеханических элементов датчика (ИП-1), последовательность этих преобразователей можно описать безинерционным усилителем (БУ) с коэффициентом передачи $K = K_2 \cdot K_3$, где K_2 и K_3 – коэффициенты передачи ИП-2 и ИП-3.

Пересчитав помеху ξ по входу этого усилителя путем умножения текущего значения ξ на коэффициент ($1 : K_2$), получим модель ИК (рис. 2) в виде последовательного соединения двух звеньев и включенного между ними сумматора, на который подается помеха $E = (\xi : K_2)$.

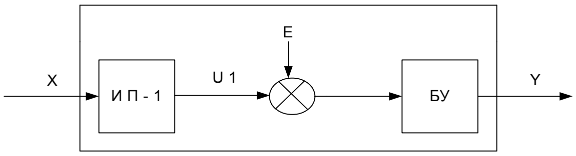

Рис. 2. Модель измерительного канала

Иногда оказывается более удобным пересчитать помеху ξ к выходу ИК, умножив её текущее значение на коэффициент передачи преобразователя ИП-3:

$$E_1 = K_3 \cdot \xi = (K \cdot \xi) : K_2.$$

Выход ИК – последовательность кодовых комбинаций, которые в идеале соответствуют поступающим на вход аналого-цифрового преобразователя (ИП-3) мгновенным значениям напряжения (или тока) $U2$ в моменты времени $t_i = i \cdot \Delta_t$, где $i = 1, 2, ..., n$; Δ_t – шаг дискретизации сигнала $U2$ по времени.

2.2. Обратный оператор

Для получения результатов измерений эти кодовые комбинации необходимо пересчитать в значения измеряемой физической величины. Чтобы практически реализовать операцию пересчета, необходимо, исходя из модели ИК, найти оператор F, определяющий преобразование мгновенных значений физической величины X, действующей на входе датчика, в кодовые комбинации Y на выходе ИК, а затем построить обратный оператор F^{-1}. При “абсолютно точном” задании оператора F^{-1} получаем

$$\widetilde{x} = F^{-1} \cdot [F(x) + E_1] = F^{-1}(y).$$

В случае линейности оператора $F_л^{-1}$ имеем

$$\widetilde{x} = F_л^{-1} \cdot F(x) + F_л^{-1} \cdot (E_1) = x + F_л^{-1} \cdot (E_1).$$

Таким образом, даже при “абсолютно точно” заданном операторе $F_л^{-1}$ результаты пересчета информации, получаемой на выходе ИК, содержат в значении измеряемой физической величины погрешность измерения $F_л^{-1} \cdot (E_1)$, обусловленную наличием нелинейных преобразований (дискретизация и квантование) в тракте ИК. На практике сведения о структуре и параметрах ИК, необходимые для построения обратного оператора F^{-1}, неизвестны полностью или частично. Недостающая информация оценивается по результатам экспериментальных исследований ИК. Наличие неизбежных ошибок оценивания приводит к тому, что реально реализуемый обратный оператор $\widetilde{F}^{-1}$ отличается от истинного F^{-1}, обуславливая появление дополнительных погрешностей в результатах измерения. Если введем понятие разностного оператора $F_\Delta = \widetilde{F}^{-1} - F^{-1}$, то:

$$\widetilde{x} = \widetilde{F}_л^{-1} \cdot [F(x) + E_1] = F_л^{-1} \cdot F(x) +$$

$$+ F_{\Delta л} \cdot F(x) + \widetilde{F}_л^{-1} \cdot (E_1) = x + F_{\Delta л} \cdot F(x) + \widetilde{F}_л^{-1} \cdot (E_1),$$

т.е. ошибка измерения равна $\varepsilon_x = \widetilde{x} - x =$

$$= \widetilde{F}_л^{-1} \cdot [F(x) + (E_1)] - x == F_{\Delta л} \cdot F(x) + \widetilde{F}_л^{-1} \cdot (E_1).$$

Заключение

Результаты исследования динамических характеристик датчиков, как линейных систем, обеспечивают повышение информативности и точности бортовых систем измерений, что позволяет получать достоверную информацию на неустановившихся режимах полета летательного аппарата и, таким образом, увеличить производительность испытательных полетов.

Литература

1. Вострокнутов Н.Г., Евтихеев Н.Н. Информационно-измерительная техника. − М.: Высш. шк., 1977. − 232 с.

2. Бескерский В.А. Цифровые автоматические системы. − М.: Наука, 1976. − 575 с.

Поступила в редакцию 12.01.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н.Н. Дмитриев, Национальный транспортный университет, Киев.