УДК 681.518.3

МЕТОД ОБРАТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ОБНАРУЖЕНИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Н. И. КОРСУНОВ
А. А. НАЧЕТОВ

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

e-mail:
korsunov@intbel.ru
aleksandr@nachetov.org.ua

В статье предлагается метод обнаружения и коррекции погрешности преобразователей при косвенных измерениях.

Ключевые слова: обратные преобразования, косвенные измерения, компенсация погрешности.

Косвенные измерения широко применяются в технических системах при решении задач диагностики и управления [1]. Системы диагностики используют преобразователи при формировании баз данных [2]. Естественно, данные преобразователи обладают сравнительно большой погрешностью, что приводит к недостоверности информации, хранимой в базах данных. Следствием этого является в ряде случаев недостоверные выводы по принятию решений на основе используемых в диагностике логических выводов.

Для повышения точности косвенных измерений используются методы введения корректирующих поправок, например использование балансного модулятора [3]. Несмотря на введение корректирующих поправок по истечению определенного времени необходимо вновь проводить измерения, вычислять погрешности, формировать корректирующие функции. Это является недостатком использования преобразователей в системах технической диагностики баз данных.

В данной работе предлагается метод обнаружения и коррекции погрешности преобразователей при косвенных измерениях.

Основная идея обнаружения и коррекции погрешностей базируется на линеаризации погрешностей аналого-цифровых преобразователей [4], когда по результатам измерений вначале и конце диапазона изменения аналогового сигнала строится прямая, а отклонение выходного значения аналого-цифрового преобразователя вычисляются относительно построенной прямой. Перенос этой идеи на обнаружение и компенсации погрешностей первичных преобразователей информации при известной функции преобразования:

$$y = f(x), \tag{1}$$

основан на подчинении модели преобразования автоизоморфизму (x и y принадлежат пространству вещественных чисел) обеспечивающему существование единственного обратного преобразования:

$$x = f^{-1}(y). \tag{2}$$

В реальных системах (1) выполняется с некоторой ошибкой ε и (1) представляется в виде:

$$y_1 = f(x) + \varepsilon_1. \tag{3}$$

При наличии погрешности (2) представляется в виде :

$$x + \Delta x = f^{-1}(y + \varepsilon_2), \tag{4}$$

при заданном $\varepsilon_2 \neq \varepsilon_1$ в общем случае.

Инструментальная погрешность может быть компенсирована нахождением такого ∂y, которое в идеальном случае обеспечивает:

$$y = y_1 + \partial y. \tag{5}$$

Компенсация ошибки ε_1 осуществляется в соответствии с (5) независимо от конкретного значения ε_2. Это обеспечивает технический эффект – использование грубых приближений прямого и обратного преобразований для получения высокоточных первичных преобразований в сборе данных.

Суть предлагаемого метода состоит в следующем. Систематическая составляющая погрешности в данных при сборе информации может быть уменьшена до сколь угодно малого наперед заданного значения при введении обратной функции преобразования с известной погрешностью.

Действительно, если существует автоизоморфизм математических моделей первичных измерительных преобразователей с функцией преобразования $f(x)$, то существует $f^{-1}(x)$ обратная функции $f(x)$, т.е. если $y = f(x)$, то $x = f^{-1}(y)$. И если:

$$y_1 = y + \Delta y = f(x) + \Delta f(x), \text{то}$$

$$x_1 = f^{-1}(y_1) + \Delta x = f^{-1}(y_1) + \Delta f^{-1}(x). \tag{6}$$

Так как преобразования осуществляются в пространстве действительных чисел, то любому математическому объекту x^k соответствует математический объект:

$$y^k = f(x^k) + \varepsilon_1^k.$$

Справедливо и обратное – объекту y_1^k соответствует объект:

$$x_1^k = f^{-1}(y_1^k) + \varepsilon_2.$$

А так как $x^k, \varepsilon_1, x_1^k, y^k, y_1^k, \varepsilon_2$ – для конкретного x^k являются фиксированными, то погрешность последовательных преобразований $f(x^k)$ и $f^{-1}(y_1^k)$ определяется как:

$$\varepsilon = f^{-1}(f(x^k) + \varepsilon_1) + \varepsilon_2 - x^k. \tag{7}$$

При известном ε_2 и вычисленном ε получаем:

$$\varepsilon - \varepsilon_2 = f^{-1}(f(x^k) + \varepsilon_1) - x^k, \tag{8}$$

и ε_1 может быть найдено из решения данного уравнения при известных значениях функций прямого и обратного преобразования. Вычислив ε_1 можно компенсировать составляющую погрешности $\Delta f(x)$ выполнив:

$$y = y_1 - \varepsilon_1. \tag{9}$$

При этом применение обратного преобразования с известной погрешностью обеспечивает обнаружение и коррекцию ошибки прямого преобразования с точностью, задаваемой погрешностью обратного преобразования ε_2. Следствием этого является необходимость выполнения обратного преобразования сочень высокой точностью. А это не приводит к решению задачи обеспечения наперед заданной погрешности прямого преобразования при известной погрешности обратного преобразования без ограничения на точность выполнения последнего.

Для компенсации погрешности прямого преобразования до наперед заданного значения при известной некоторой погрешности обратного преобразования решим задачу нахождения корректирующей поправки δf, которая приведет $y + \delta y$ к $f(x)$ при $y \neq f(x)$.

Определим ε_1 при неизвестном значении функции прямого преобразования $f(x)$. Из (7) определим погрешность ε при компенсации погрешности ε_1 из выражения:

$$\varepsilon = \lim_{\varepsilon_1 \to 0} f^{-1}[(f(x) + \varepsilon_1] + \varepsilon_2 - x = f^{-1}[f(x)] + \varepsilon_2 - x = \varepsilon_2. \tag{10}$$

При существовании погрешности ε_1 представим выражение (10) в виде:

$$f_1(x) = f(x) + \varepsilon_1 = Wf(x), \tag{11}$$

и запишем среднеквадратическую ошибку *E* в виде:

$$E = (f^{-1}(f_1(x) - x^*)^2 = (f^{-1}(Wf(x) - x^*)^2, \tag{12}$$

где $x^* = x + \varepsilon_2$.

Если положить $W = 1 + \delta f$, то задача компенсации ошибки прямого преобразования сводится к нахождению такого δf , которое обеспечивает минимум (12).

Данная задача относится к задачам безусловной оптимизации и решается градиентным методом, при котором вектор веса W в (12) изменяется в направлении противоположном значению *E*, что представляется выражением:

$$W(j+1) = W_j + hg(j) - e(j), \tag{13}$$

где значение $W(j+1), W(j), e(j)$ берутся на соответствующих шагах процесса адаптации, $g(j)$ – направление противоположное направлению изменения ошибки (12), а h некоторый параметр, задающий скорость адаптации. Тогда второе слагаемое в (13) определяет значение δf . При этом начальное значение $W(0) = 1, \delta f(0) = 0$.

Перенесем решение задачи компенсации погрешностей прямого преобразования на преобразование функции многих переменных.

Будем считать, что x является вектором с компонентами $x_1, x_2, \ldots, x_n$. Тогда преобразующая функция представляется функцией многих переменных. Для обнаружения ошибки прямого преобразования и ее компенсации достаточно обратного преобразования хотя бы для получения одного из аргументов функции.

Рассмотрим преобразующую функцию двух переменных

$$y = f(a,b), \tag{14}$$

для которой существует единственное обратное преобразование:

$$a_1 = f^{-1}(y,b). \tag{15}$$

Пусть как и ранее преобразования (14), (15) выполнены соответственно с погрешностями $\varepsilon_1, \varepsilon_2$. В этом случае:

$$y_1 = f(a,b) + \varepsilon_1, \tag{16}$$

$$a_1 = f^{-1}(y_1,b) + \varepsilon_2, \tag{17}$$

и (7) представляется в виде:

$$\varepsilon = a_1 - a = f^{-1}(f(a,b)b) + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - a. \tag{18}$$

При известном ε_2 и вычисленном ε аналогично (7) получаем:

$$f^{-1}(f(a,b) + \varepsilon_1, b) - a = \varepsilon - \varepsilon_2. \tag{19}$$

Из которого при известном значении $f(a,b)$ может быть определена ε_1 и далее скорректировано значение y_1 согласно (9).

Определим значение ε при минимуме погрешности ε_1 в (18):

$$\varepsilon = \lim_{\varepsilon_1 \to 0} [f^{-1}(f(a,b) + \varepsilon_1), b) + \varepsilon_2 - a] = \varepsilon_2. \tag{20}$$

Отличие выражения (20) от (10) заключается лишь в функции прямого преобразования, которое в данном случае является функцией двух переменных, что приводит и функцию обратного преобразования в функцию двух переменных:

$$f^{-1}(y,b) = f^{-1}(f(a,b),b). \tag{21}$$

Из значения погрешности ε при минимальном значении погрешности прямого преобразования (20) следует, что требуемое значение функции обратного преобразования следует определить как:

$$a^* = a + \varepsilon_2.$$

Тогда условие минимума погрешности прямого преобразования ε_1 определяется минимальной среднеквадратической ошибкой:

$$E = (a - a^*)^2,$$

где a – определяется (17) и представляет результат обратного преобразования.

Как и ранее примем в (20):

$$f_1(a,b) + \varepsilon_1 = y_1,$$

и представим:

$$a = f^{-1}(f(y_1,b) + \varepsilon_2) = f^{-1}(Wf(a,b)b) + \varepsilon_2 \qquad (22)$$

В этом случае компенсация погрешности прямого преобразования сводится к определению такого значения W, которое обеспечивает минимум среднеквадратической ошибки и не отличается от минимизации (12) при замене $f(x)$ на $f(a,b)$.

Таким образом, метод обратных преобразований при косвенных измерениях позволяет не только обнаружить погрешность преобразователей, но и скорректировать ошибочный результат.

Литература

1. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики / Под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1981. – 320с.
2. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системо-техническое проектирование. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 438с.
3. Тимонтеев, Валерий Николаевич. Аналоговые перемножители сигналов в радиоэлектронной аппаратуре / В. Н. Тимонтеев, Л. М. Величко, В. А. Ткаченко, 1982. – 113с.
3. Гельман М.М. Аналого-цифровые преобразователи для информационно-измерительных систем /Гельман М.М. .-М.: Изд-во стандартов, 2009 . – 317с.

THE INVERSION TRANSFORMATION IN DETECTING COMPENSATING FOR ERRORS AT INDIRECT MEASUREMENTS

N. I. KORSUNOV
A. A. NACHETOV

Belgorod National Research University

e-mail: aleksandr@nachetov.org.ua

The paper proposes a method of detecting and correcting errors in the indirect measurement transducers.

Keywords: inverse transformations, indirect measurement, error compensation.