

## АЛГОРИТМ ИСКЛЮЧЕНИЯ СБОЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрена коррекция экспериментальных данных с целью исключения сбойных измерений. Поставлена задача коррекции и указана ее значимость при обработке измерительной информации. Охарактеризованы существующие подходы к решению задачи. С учетом положительных сторон рассмотренных подходов предложен алгоритм исключения сбойных измерений. Алгоритм использует помехоустойчивое оценивание экспериментальных данных. Приведен пример результатов решения задачи восстановления сбойных измерений с использованием описанного алгоритма.

Коррекция измерительной информации, заключающаяся в исключении сбойных измерений, является наиболее трудным вопросом при обработке измерительной информации. Коррекция обеспечивает высокую достоверность результатов анализа информации, позволяет использовать широко распространенный в практике исследования по экспериментальным данным метод наименьших квадратов.

Пусть  $\{(x_1, t_1), \dots, (x_N, t_N)\}$  — выборка измерений, которая возможно содержит сбойные измерения. Выборка описывает поведение многорежимного параметра, имеющего на интервале времени переходные и установившиеся режимы поведения. Естественно предположить, что измерения имеют в общем случае симметричное распределение. Сбой может быть выражен единичным измерением или группой следующих друг за другом измерений. Необходимо провести коррекцию выборки с целью исключения сбойных измерений.

Будем полагать, что поведение параметра на интервале  $[t_n, t_{n+n}]$  описывается временной зависимостью

$$x(t) = \theta_0 + \theta_1 (t - \bar{t}) + \theta_2 (t - \bar{t})^2,$$

$$\text{где } \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=h}^{h+n} t_i.$$

Такие интервалы всегда можно выделить разбиением интервала наблюдения на отрезки требуемой длительности. Для отличия сбоя от переходного режима введем ограничение на длительность сбоя  $\Delta t_c$ ;

$$\Delta t_c < \Delta t_g, \quad \text{где } \Delta t_g - \text{допустимая длительность сбоя.}$$

Существует несколько подходов к решению поставленной задачи, связанных с использованием: непараметрических статистических выводов; устойчивых параметрических статистических выводов; выводов, основанных на сравнении прогнозируемого значения с текущим измерением. Непараметрические выводы строятся на основе проверки статистических гипотез: по выбранному критерию и заданному  $\alpha$ -уровню значимости принимается или отвергается гипотеза о наличии сбойных измерений в выборке. Критерием является правило сравнения нормированного отклонения фактического измерения  $x_i$  с критическим. В настоящее время такой подход при практическом использовании имеет трудности [1], связанные с отсутствием для регрессионных зависимостей табличных критических значений и связанные с выбором  $\alpha$ -уровня значимости при последовательном выявлении сбойных измерений и выбором количества сбойных измерений при выявлении нескольких сбойных измерений. Устойчивые параметрические статистические выводы используют методы помехоустойчивого оценивания [2]. Остаточные разности  $r_i(\theta) = x_i - x(t_i)$ , построенные на основе помехоустойчивых оценок коэффициентов  $\theta^T = (\theta_0, \theta_1, \theta_2)$ , указывают на сбойные измерения. Сбойными измерениями являются те, для которых остаточные разности существенно, в  $k$  раз, превышают помехоустойчивую меру рассеяния  $S$ :  $|r_i(\theta)| > kS$ , где  $S = \text{med}|r_i(\theta)|/0,6745$ . Операция нахождения медианы проводится с учетом длительностей наблюдения измерений  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ . В классе  $M$ -оценок помехоустойчивая оценка  $\theta$  является решением уравнения

$$\sum_{i=h}^{h+n} T_i^T \psi(r_i(\theta)/S) = 0, \quad (I)$$

$$\text{где } T_i^T = (1, (t_i - \bar{t}), (t_i - \bar{t})^2),$$

$\psi(\cdot)$  - функция, обеспечивающая наименьшее смещение оценки.

В литературе [2] предложено несколько видов функций  $\psi$ , в качестве наиболее простой может быть выбрана монотонная функция Хубера

$$\psi(x) = \begin{cases} x, & |x| \leq a \\ a \cdot \text{sign}(x), & |x| > a, \quad a = 1,5. \end{cases}$$

Величина  $a$  зависит от доли сбойных измерений в выборке: если доля сбойных измерений не превышает 10%, то  $a$  принадлежит отрезку [1.14; 2.63] [1]. Уравнение (1) с заданной точностью решается по итерационной схеме средневзвешенного метода наименьших квадратов:

$$\begin{cases} \theta^{(k+1)} = \left( \sum_{i=h}^{h+n} W_i(\theta^{(k)}) T_i^T T_i \right)^{-1} \sum_{i=h}^{h+n} W_i(\theta^{(k)}) T_i^T x_i \\ W_i(\theta^{(k)}) = \psi(r_i(\theta^{(k)})/s) / (r_i(\theta^{(k)})/s). \end{cases} \quad (2)$$

В качестве начального приближения может быть выбрана оценка по методу наименьших квадратов. Применение методов помехоустойчивого оценивания при коррекции измерительной информации гарантирует качественные результаты коррекции при присутствии в выборке до 10% сбойных измерений [2]. Однако применение этих методов требуется для многорежимных параметров дополнительных операций выделения режимов. Эти методы являются трудоемкими по сравнению с методами коррекции, основанными на сравнении прогнозируемого значения со значением текущего измерения [3]. Последние методы используют свойство сбойных измерений существенно отклоняться от прогноза. Измерение считается сбойным, если  $\varepsilon_i > \varepsilon_g$ , где  $\varepsilon_g$  - допустимая погрешность измерения,  $\varepsilon_i = |x_i - x^*|$  - оценка погрешности  $i$ -измерения,  $x^*$  - прогнозируемое значение  $i$ -измерения. В общем случае наиболее надежным прогнозом с учетом возможного переходного режима поведения параметра является прогноз, построенный на основе регрессионного анализа по  $R$  предыдущим измерениям:

$$x^* = T_i \theta,$$

(3)

$$\text{где } \theta = \left( \sum_{j=i-t-R}^{i-1} T_j^T T_j \right)^{-1} \sum_{j=i-t-R}^{i-1} T_j^T X_j.$$

Недостатком методов коррекции, основанных на сравнении прогнозируемого значения со значением текущего измерения, является незащищенность прогноза от влияния сбоев. Представляется целесообразным иметь хотя бы первый помехоустойчивый прогноз.

Предлагаемый алгоритм исключения сбойных измерений составлен на основе рассмотренных методов коррекции: на начальном участке каждого режима поведения параметра строится помехоустойчивый прогноз, далее прогноз строится на основе регрессионного анализа. Алгоритм позволяет качественно проводить коррекцию измерительной информации и включает следующие этапы.

1. Если зафиксирован новый режим поведения параметра, то перейти к п. 2, в противном случае - переход к п. 3.

2. Если  $h+n+1 \leq N$ , где  $h$  - индекс измерения, соответствующего началу режима,  $n$  - количество измерений начального участка, то возможно построение помехоустойчивого прогноза по формулам (2); прогноз найден, если текущее и предыдущее множества сбойных измерений совпадают, измерения, для которых  $|r_i(\theta)| > a s$ , считать сбойными,  $i = h+n$ ; если допустимая погрешность измерений не задана, то  $\varepsilon_g = a s$  и возможен переход к п. 4, в противном случае - останов.

3. Если  $i \leq N$ , то возможно построение прогноза на основе регрессионного анализа по формуле (3) и переход к п. 4, в противном случае - останов.

4. Если  $i < N$ , то возможно построение оценки погрешности измерений  $\varepsilon_i$  и переход к п. 5, в противном случае - останов.

5. Если  $\varepsilon_i > \varepsilon_g$ , то измерение предполагается сбойным, в противном случае  $i = i+1$  и переход, если зафиксирована правая граница сбоя, к п. 6, в противном случае - к п. 4. Если предполагаемое сбойное измерение встретилось первым, то фиксируется

левая граница предполагаемого сбоя:  $h=i$ ,  $\Delta t_c = \Delta t_i$ ,  $n_c = 1$ , в противном случае  $n_c = n_c + 1$ ,  $\Delta t_c = \Delta t_c + \Delta t_i$ , где  $n_c$ ,  $\Delta t_c$  - количество измерений и длительность предполагаемого сбоя.

6. Если  $\Delta t_c > \Delta t_g$ , то измерения  $(x_h, t_h) \dots (x_{h+n_c}, t_{h+n_c})$  считать сбойными. Предположив, что в момент  $t_h$  произошло переключение режимов, осуществить переход к п. 1, в противном случае измерения  $(x_h, t_h) \dots (x_{h+n_c}, t_{h+n_c})$  считать сбойными и перейти к п. 4.

В таблице представлены наборы данных, взятые из задачи обработки измерительной информации с целью восстановления сбойных измерений. Измерения велись через равные промежутки времени. Исходные данные с порядковыми номерами 1, 2, 18, 20, 21, 22 признаны сбойными и заменены в последовательности обработанных данных соответствующими прогнозируемыми значениями.

Т а б л и ц а  
Набор данных по обработке измерительной информации

№ по порядку	Исходные данные	Обработанные данные	№ по порядку	Исходные данные	Обработанные данные
1	132.8431	128.3107	13	129.0135	129.0135
2	132.8431	128.3110	14	129.0135	129.0135
3	127.9156	127.9156	15	129.0135	129.0135
4	127.9156	127.9156	16	128.7066	128.7066
5	128.7066	128.7066	17	128.7066	128.7066
6	129.0135	129.0135	18	132.9435	129.0005
7	129.0135	129.0135	19	128.3878	128.3878
8	128.3878	128.3878	20	135.1267	128.8756
9	128.7066	128.7066	21	135.1610	128.8001
10	127.8347	127.8347	22	130.1110	128.7092
11	127.1592	127.1592	23	128.3878	128.3878
12	127.1592	127.1592			

Приведенный алгоритм позволяет с помощью задаваемых аргументов  $R, n, a, \varepsilon_g, \Delta t_g$  проводить настройку коррекции измерительной информации на конкретный характер поведения параметра и помех. При  $n = \mathcal{N}$  алгоритм полностью соответствует помехоустойчивому оцениванию временной зависимости. Выходными данными алгорит-

ма являются выборка скорректированных измерений и выборка сбойных измерений. Алгоритм реализован в системе программного обеспечения обработки и оценки измерительной информации.

#### Библиографический список

1. Смоляк С.А., Титаренко Б.П. Устойчивые методы оценивания. М.: Статистика, 1980. 208 с.
2. Устойчивые статистические методы оценки данных /Под ред. Р.Д.Лонера, Т.Н.Уилкинсона. М.: Машиностроение, 1984. 230 с.
3. Фомин А.Ф., Новоселов О.Н., Плющев А.В. Отбраковка аномальных результатов измерений. М.: Энергоатомиздат, 1985. 200 с.

УДК 621.391.823:681.3

О.Ф.Григорьев, Ю.Н.Секисов, Е.А.Симановский

Куйбышевский авиационный институт им. академика С.П.Королева

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ ДЛЯ ПОМЕХ КОММУТАЦИОННОГО ТИПА

Описана методика определения параметров электромагнитных полей, определяемых наличием помех коммутационного типа. Предложены физическая и математическая модели рецептора, приведены результаты расчетов.

С развитием общества постоянно возрастает число радиоэлектронных средств (РЭС), применяемых практически во всех отраслях народного хозяйства. В связи с этим необходимо решать задачи электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных устройств, проводить работы по их помехозащищенности, оценивать влияние непре-

---

Автоматизация научных исследований. Куйбышев, 1990.

---