А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я
№ 1 1982

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.2.088

А. Е. ЩАДИЛОВ
(Ленинград)

СЖАТИЕ ДАННЫХ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ПОКАЗАНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Улучшение характеристик измерительных систем летательных аппаратов во многом связано с выбором способов устранения измерительных погрешностей [1]. Совершенствование микропроцессорной техники позволяет применять численные алгоритмы коррекции измерений [2], обеспечивающие требуемую точность и оперативность обработки измерительной информации. В работе рассматривается задача минимизации объема числовых данных, которые необходимо хранить в памяти бортовой микро-ЭВМ, устраняющей из показаний измерительного прибора систематическую погрешность.

Для конкретного измерительного прибора систематическая погрешность измерений Δ_c представляет собой детерминированную функцию нескольких факторов: внешних условий, режима полета, режима работы силовых установок и т. д. Ограничимся в дальнейшем рассмотрением двух влияющих параметров x, y с заданными границами изменения каждого (учет большего числа параметров не приводит к принципиальным изменениям в предлагаемой методике).

Пусть из стендовых испытаний заранее известны точные значения систематической погрешности, соответствующие конечному набору комбинаций значений параметров $x=x_i$, $y=y_j$ $(i=\overline{1, k}, j=\overline{1, l})$: $\Delta_c=F(x_i, y_j)$. Для проведения в полете коррекции измерений необходимо знать систематическую погрешность Δ_c, отвечающую текущим значениям параметров x, y. Величина Δ_c приближенно вычисляется путем интерполяции имеющихся экспериментальных данных $\Delta_c=F(x_i, y_j)$ $(i=\overline{1, k}, j=\overline{1, l})$. Точность вычисления Δ_c существенно зависит от числа опорных точек (x_i, y_j) и используемого вида интерполяции. Чтобы вычисленное значение Δ_c мало отличалось от реального, необходимо задать большое число опорных точек, т. е. взять большие значения k, l. Однако ограниченный объем памяти бортовой микро-ЭВМ, осуществляющей коррекцию, не в состоянии вместить появляющийся объем экспериментальных данных о поведении систематической погрешности. Как правило, объем данных в несколько раз превышает выделенный для его хранения объем памяти. Возникает необходимость подвергнуть данные предварительному сжатию, чтобы стало возможным их размещение в памяти микро-ЭВМ. Ошибка вычисления систематической погрешности по сжатым данным не должна превышать заранее заданной величины $\delta=\delta(x, y)$, определяемой эксплуатационными характеристиками системы, которую обслуживает данный измерительный прибор.

Рассматриваемая постановка задачи отличается от известных в литературе постановок задач по минимизации числовых массивов [3]. Необходимо, чтобы решение задачи осуществлялось на базе стационарной ЭВМ, расчет сжатия в режиме реального времени не требуется.

Экспериментальные данные, описывающие поведение систематической погрешности, имеют вид дискретной функциональной зависимости $\Delta_c=F(x_i, y_j)$. Считаем, что изменение аргументов x, y происходит с постоянным шагом h_x, h_y соответственно. Тогда область определения $F(x_i, y_j)$ представляется в виде узлов равномерной сетки, разбивающей в плоскости xy прямоугольник

$$H=\{(x, y): x\in[x_1, x_k], y\in[y_1, y_l]\}$$

на ячейки-прямоугольники со сторонами длиной h_x, h_y. Общее количество чисел N, использованных в описании $F(x_i, y_j)$, с учетом равномерности сетки составляет $\sim kl$, т. е. будем считать, что $N=kl$.

Дадим формулировку задачи о сжатии, пользуясь терминологией, принятой в задачах аппроксимации сеточных функций [4], а именно: требуется построить некоторую функцию $\tilde{F}_n(x, y)$, заданную на H и аппроксимирующую на сетке функцию

$F(x_i, y_j)$. Индекс n показывает общее количество чисел в описании функции $F_n(x, y)$, т. е. число параметров, по которым в любой точке $(x, y) \in H$ с помощью предусмотренных в микропроцессоре операций можно вычислить систематическую погрешность. Сжатие характеризуется выполнением неравенства

$$n \ll N, \tag{1}$$

а точность воспроизведения Δ_c на H задается условием

$$|F(x_i, y_j) - F_n(x_i, y_j)| \leqslant \delta(x_i, y_j) \quad (i=\overline{1, k},\ j=\overline{1, l}). \tag{2}$$

При соблюдении (1), (2) качество аппроксимации (сжатия) зависит от коэффициента сжатия $K_{\text{сж}} = N/n$.

Стандартные методы аппроксимации сеточных функций нескольких переменных [4] не предусматривают выполнения (1), кроме того, их применение затруднено из-за возможной нерегулярности поведения $F(x_i, y_j)$ на сетке. Предлагаемый метод решения состоит в переходе к минимально возможному числу задач аппроксимации функций одного сеточного аргумента.

Фиксируя на сетке значение $y=y_j$, получаем одномерное сечение $f_j(x_i)$ $(i=\overline{1, k})$ функции $F(x_i, y_j) : f_j(x_i) \equiv F(x_i, y_j)$ $(y_j = \text{const})$. Семейство сечений $f_j(x_i)$ $(j=\overline{1, l})$ заменяет $F(x_i, y_j)$ в смысле полноты описания Δ_c на H. Представляется целесообразным разбить это семейство на отдельные классы (группы сечений) так, чтобы в каждом одном классе оказались сечения, допускающие аппроксимацию посредством одной и той же функции аргумента x при соблюдении (2). Сечения из одного класса не обязательно должны соответствовать близким значениям y_j на сетке. Чем меньше число построенных классов, тем меньше задач одномерной аппроксимации предстоит дальше решить, тем выше ожидаемое значение коэффициента сжатия $K_{\text{сж}}$. После проведения разбиения на классы может быть составлена таблица, в которой приведены списки номеров сечений в каждом классе. Вычисление значения искомой функции $F_n(x, y)$ в любом узле сетки (x_i, y_j) состоит в отыскании по этой таблице того класса, которому принадлежит сечение $f_j(x_i)$, и в последующем вычислении в точке $x=x_i$ значения аппроксимирующей этот класс функции аргумента x.

Для выяснения условий, при которых сразу несколько сечений можно аппроксимировать одной и той же функцией переменного x, введем в рассмотрение зоны допустимой погрешности при аппроксимации или просто зоны погрешности. Для одного сечения $f_j(x_i)$ зону погрешности $\mathscr{L}_j$ определим в виде набора отрезков $\mathscr{L}_j(x_i)$ $(i=\overline{1, k})$ плоскости $x\Delta_c$:

$$\mathscr{L}_j(x_i) = \{(x, \Delta_c) : x=x_i,\ \Delta_c \in [f_j(x_i) - \delta(x_i, y_j),\ f_j(x_i) + \delta(x_i, y_j)]\}.$$

В соответствии с (2) отрезок $\mathscr{L}_j(x_i)$ представляет собой множество точек, через которые на плоскости $x\Delta_c$ при $x=x_i$ может пройти график функции $g_j(x)$, аппроксимирующей $f_j(x_i)$ (рис. 1). Если взять два сечения $f_j(x_i)$, $f_p(x_i)$, то, очевидно, что их совместная аппроксимация одной функцией $g_{jp}(x)$ возможна тогда и только тогда, когда выполнено условие (рис. 2):

$$\mathscr{L}_j(x_i) \cap \mathscr{L}_p(x_i) \neq \varnothing \quad (i=\overline{1, k}).$$

Общую для сечений $f_j(x_i)$, $f_p(x_i)$ зону погрешности $\mathscr{L}_{jp}$ задает набор отрезков $\mathscr{L}_{jp}(x_i)$ $(i=\overline{1, k})$:

$$\mathscr{L}_{jp}(x_i) = \mathscr{L}_j(x_i) \cap \mathscr{L}_p(x_i).$$

Если хотя бы при одном значении i окажется, что $\mathscr{L}_j(x_i) \cap \mathscr{L}_p(x_i) = \varnothing$, то зона $\mathscr{L}_{jp}$ будет считаться пустой, совместная аппроксимация $f_j(x_i)$, $f_p(x_i)$ с соблюдением (2) невозможна. Зона погрешности, общая для совокупности r сечений, представляет собой результат пересечения всех r зон погрешности. Возможность совместной аппроксимации однозначно определяется наличием у этих сечений непустой общей зоны погрешности. Итак, разбиение на классы всего семейства сечений $f_j(x_i)$ $(j=\overline{1, l})$ следует проводить при соблюдении условия непустоты общей зоны погрешности каждого класса.

Алгоритм построения разбиения должен приводить к нахождению минимума числа формируемых классов, однако достижение точного минимума практически удается осуществить только при малых k, l. Это вызвано тем, что полный перебор возможных вариантов разбиения связан с большим временем счета на ЭВМ, а переход к сокращенному перебору [3] в условиях задачи невозможен. Приходится заменить требование минимальности числа классов на более слабое: необходимо формировать по очереди каждый класс так, чтобы в него вошло максимальное число сечений. Приведем описание реализованных на ЭВМ вариантов алгоритма. Программы составлены на языке ФОРТРАН-IV.

Вариант 1. Построение очередного класса начинается с анализа всех попарных зон погрешности нерасклассифицированных сечений. В качестве порождающего новый класс сечения берется то, у которого число связанных с ним непустых попарных зон погрешности максимально. Расширение класса осуществляется так, чтобы общая зона погрешности уже сформированной части класса и очередного добавляемого сечения имела максимально возможное число непустых пересечений с зонами по-

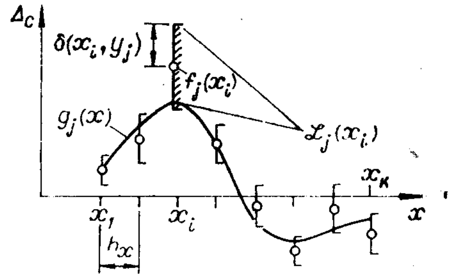

Рис. 1.

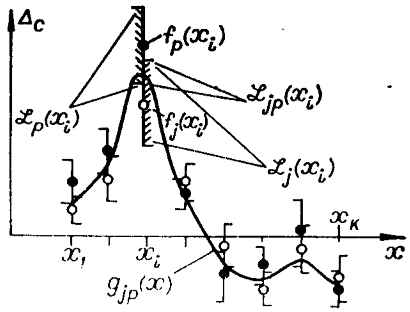

Рис. 2.

грешности сечений, еще не попавших ни в один из классов, т. е. потенциальных кандидатов на включение в формируемый класс. Формирование класса прекращается, как только любое дальнейшее добавление приводит к появлению пустой зоны погрешности.

Вариант 2. Для каждого сечения $f_j(x_i)$ $(j=\overline{1, l})$ вычисляется сеточный аналог S_j какой-либо из норм, например:

$$S_j = \| f_j(x_i) \|_{h, L_2} \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^{k} f_j^2(x_i) h_x}.$$

Перед началом формирования нового класса определяется среднее арифметическое S всех S_j, соответствующих нераскласcифицированным сечениям. В качестве порождающего класс берется сечение $f_j(x_i)$, у которого значение S_j наиболее близко к S. Каждое последующее сечение включается в класс при условии, что вносимое им изменение общей зоны погрешности минимально в смысле рассматриваемой метрики. Условие окончания формирования класса то же, что и в варианте 1.

Вариант 3. Сечение, порождающее новый класс, выбирается таким, как в варианте 2, дальнейшее формирование класса осуществляется по схеме варианта 1.

Расчеты на ЭВМ при условии, что $\delta(x, y)$ составляет $\sim 5\%$ от Δ_c, показали, что для различных типов измерительных приборов на этапе разбиения сечений на классы достигается коэффициент сжатия $K_{сж} = 3 \div 10$ в зависимости от степени нерегулярности поведения $F(x_i, y_j)$ на сетке. Результаты применения различных вариантов алгоритма отличаются незначительно. Это дает основание считать, что в тех случаях, когда требуется получить значение $K_{сж}$ из указанного диапазона, применение изложенной методики разбиения на классы оправдано.

В заключение заметим, что при удачном подборе функций, аппроксимирующих построенные классы, можно добиться дальнейшего увеличения значения $K_{сж}$ и тем самым еще более повысить эффективность метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Боднер В. А.** Авиационные приборы.— М.: Машиностроение, 1969.
2. **Ильинский В. М.** Системы контроля авиационных силовых установок.— М.: Транспорт, 1980.
3. **Дробышев Ю. П., Соколов С. П.** Минимизация больших массивов данных.— Автометрия, 1975, № 1.
4. **Бахвалов Н. С.** Численные методы.— М.: Наука, 1975, т. 1.

Поступило в редакцию 17 июля 1981 г.

УДК 519.246

А. Г. БУЙМОВ, Н. А. БУЙМОВА

(Томск)

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО РАЗМАСШТАБИРОВАНИЮ, ВРАЩЕНИЯМ И СДВИГАМ

При опознавании изображений на основе сравнения с эталонами возникает необходимость согласования сравниваемых изображений по масштабам, поворотам и сдвигам. Точность согласования сильно зависит от автокорреляционных функций