АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АППРОКСИМАЦИИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ДАТЧИКА МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

А.Ф.Иванов
Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г.Севастополь, ул. Капитанская, 2

В СТД-измерениях также как в любых других видах измерений проявляются совместно систематические, случайные и динамические погрешности. Систематические погрешности могут быть обнаружены и почти полностью устранены при поверке измерительных каналов СТД-систем в стационарных или судовых условиях путем повторной их аттестации по образцовым мерам. Влияние случайных и динамических погрешностей на результаты измерений для находящихся в эксплуатации СТД-систем может быть значительно уменьшено только путем соответствующей математической обработки данных: коррекции динамических и сглаживания случайных погрешностей измерений. Обе операции могут быть выполнены раздельно, но это требует проведения двух последовательных прогонов ряда измерений. При большом количестве покадровых измерений это приводит к дополнительным затратам рабочего времени ПЭВМ. В отчетах [1,2] был предложен алгоритм обработки СТД-данных, совмещающий в себе обе эти операции. Он был выведен из следующих предположений: равномерности опросов датчика температуры, линейности изменения температуры датчика на интервале сглаживания, проводимого по методу наименьших квадратов (МНК), описания канала температуры инерционным звеном первого порядка.

Для сглаживания случайных погрешностей СТД-данных в зависимости от их уровня приходится брать от 5 до 15 последовательных отсчетов измеряемого элемента. Но линейность в изменении температуры датчика, например, при скачкообразном изменении температуры окружающей среды (ступенчатые структуры в океане) сохраняется лишь на интервале времени $0,3 \cdot \theta$ (θ - постоянная времени датчика температуры). Для выполнения требования по линейности период опроса датчика Δt должен быть в 15-50 раз меньше, чем величина θ. Это условие с трудом выполняется для немногих СТД-систем. Чтобы сделать доступным предложенный метод обработки для большинства СТД-систем, необходимо отказаться от требования линейности и допустить, что температура датчика изменяется во времени на интервале сглаживания по параболическому закону при сохранении неизменными всех остальных допущений. Будем излагать новый алгоритм фильтрации с параллельным описанием алгоритма с линейной аппроксимацией.

Пусть T - температура, измеренная датчиком температуры СТД-системы в момент времени t. Допустим, что на интервале сглаживания, состоящего из N точек (N - нечетное число натурального ряда чисел), изменение температуры датчика во времени можно аппроксимировать прямой линией

$$T = A + B \cdot t, \qquad (1)$$

или параболой

$$T = C + D \cdot t + E \cdot t^2 \qquad (2)$$

Так как в измерениях T - содержатся случайные погрешности, то постоянные коэффициенты A, B, C, D, E находятся с использованием метода наименьших квадратов. Традиционные формы записи коэффициентов можно найти в учебниках и монографиях по МНК [3]. В формулах, приведенных в этих источниках, отсутствуют ограничения на характер изменения t. Если измерения температуры равно отстоят друг от друга, то можно записать $t_i = \Delta t \cdot i$. Тогда коэффициенты A, B, C, D, E будут выглядеть следующим образом:

$$A=2\frac{2N^2+3N+1}{N^2-1}\cdot\overline{T}-\frac{6}{N-1}\cdot\overline{iT}, \qquad (3)$$

$$B=\frac{12}{\Delta t\cdot(N^2-1)}\cdot[\overline{iT}-\frac{N+1}{2}\cdot\overline{T}], \qquad (4)$$

$$C=\frac{3}{(N-1)(N-2)}\cdot[(3N^2+3N+2)\cdot\overline{T}-$$

$$-6(2N+1)\cdot\overline{iT}+10\cdot\overline{i^2T}] \qquad (5)$$

$$D=-\frac{6}{\Delta t\cdot(N^2-1)(N^2-4)}[3(N+1)(N+2)(2N+1)\cdot\overline{T}-$$

$$-2(2N+1)(8N+11)\cdot\overline{iT}+30(N+1)\cdot\overline{i^2T}] \qquad (6)$$

$$E=\frac{30}{\Delta t^2(N^2-1)(N^2-4)}[(N+1)(N+2)\cdot\overline{T}-$$

$$-6(N+1)\cdot\overline{iT}+6\cdot\overline{i^2T}] \qquad (7)$$

где $\overline{T}$, $\overline{iT}$ и $\overline{i^2T}$ - средние значения переменных T_i, iT_i и i^2T_i на интервале сглаживания N.

Измерения T содержат кроме случайных еще и динамические погрешности. Опишем реакцию датчика температуры T на изменение температуры окружающей среды T_0 обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка

$$\theta\frac{dT}{dt}+T=T_o \qquad (8)$$

Если подставим аппроксимирующие функции (1) и (2) в уравнение (8), то получим следующие выражения для истинной температуры T_o:

при линейной аппроксимации

$$T_0=(A+B\theta)+Bt, \qquad (9)$$

при параболической аппроксимации

$$T_0=(C+D\theta)+(D+2E\theta)t+Et^2 \qquad (10)$$

Представим постоянную времени θ датчика температуры в периодах опроса Δt этого канала, то есть $\gamma=\theta/\Delta t$, и найдем температуру окружающей среды в средней точке (N+1)/2 интервала сглаживания:

для аппроксимации T линией:

$$T_o=[A+0{,}5\cdot B\cdot\Delta t(N+1)]+\gamma\cdot B\cdot\Delta t \quad (11)$$

для аппроксимации T параболой:

$$T_0=[C+0{,}5\cdot D\cdot\Delta t\cdot(N+1)+0{,}25\cdot E\cdot\Delta t^2(N+1)^2]+$$
$$+\gamma\cdot[D\cdot\Delta t+E\cdot\Delta t^2(N+1)] \qquad (12)$$

Алгоритм (11) полностью тождественен алгоритму работы [1,2], хотя и выглядит несколько по-иному. Это объясняется тем, что формула записи средней истинной температуры T_o, приведенная в [1,2], и формула (11) текущей температуры T_o для средней точки (N+1)/2 интервала сглаживания N, выведенная в этой работе, полностью совпадают. При параболической аппроксимации T формулы записи T_o для средней температуры на интервале N и текущей температуры в середине интервала (N+1)/2 уже отличаются третьим членом в первой квадратной скобке.

Численные оценки всех характеристик являются предметом следующего исследования. Но уже сейчас из анализа формул можно сделать некоторые предварительные оценки. Операция коррекции (уменьшения) динамических погрешностей увеличивает одновременно уровень случайных погрешностей и тем сильнее, чем больше значение γ. Но при большом γ можно взять и большое значение N, что, в свою очередь, уменьшает величину случайной погрешности при соблюдении требования по линейности. Если же время $N\cdot\Delta t>>0{,}3\theta$, то требование по линейности уже не выполняется и следует использовать формулы с параболической аппроксимацией T. Но при этом увеличивается время обработки. Увеличение N сначала сильно (пропорционально $1/\sqrt{N}$), затем слабее уменьшает уровень случайных погрешностей, в то время как время обработки возрастает пропорционально N. По этой причине, когда $N\approx15$, дальнейшее увеличение N становится мало эффективным.

Если при обработке используются всего три измерения (N=3), то тогда число вычисляемых коэффициентов C, D, E равно числу расчетных узлов. Предлагаемый в работе метод (формулы: 2, 5 - 7, 8, 10, 12) теряет свое ценное свойство (сглаживание случайных погрешностей измерений), так как лежащий в его основе метод наименьших квадратов вырождается. Полученная МНК-функция совпадает с интерполяционной функцией, а парабола, аппроксимирующая данные измерений, точно проходит через три экспериментальные точки. Этот частный случай совпадает по смыслу с первым алгоритмом динамической коррекции, предложенным в МГИ АН УССР в 1974 году [4]. При его применении для обработки данных измерений температуры СТД-систем удавалось значительно снизить динамическую погрешность, возникающую из-за применения в зонде инерционного датчика температуры (θ=1 с, Δt=1,6 с), но одновременно с этим положительным результатом в выходном сигнале (в скорректированной температуре) усиливалась шумовая составляющая.

Литература

1. Fofonoff N.P., Hayes S.P., Millard R.C. W.H.O.I./Brown CTD microprofiler: methods of calibration and data handling. Technical report WHOI-74-89, Woods Hole, Massachusetts, USA, 1974. - 66 pp.
2. The acquisition, calibration, and analysis of CTD data. A Report of SCOR Working Group 51. Unesco technical papers in marine science 54, Unesco, Paris, 1988. - 94 pp.
3. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: ГИФМЛ, 1962. - 350 с.
4. Забурдаев В.И., Иванов А.Ф., Кушнир В.М., Смирнов Г.В., Юсупова Т.А. Некоторые вопросы обработки автоматизированных гидрологических измерений. В кн. Морские гидрофизические исследования, №4 (67), Севастополь: МГИ АН УССР, 1974. - С.183-194.