

Библиографический список

1. Канунников И.И., Сидоренко М.К. Исследование переменных напряжений в лопатках ГТД методами спектрального анализа // Проблемы прочности. - 1979. - № 12. - С. 96-100.
2. Костин В.И., Сундуков Е.В. К вопросу выбора полосы пропускания фильтра при измерениях интенсивности общей вибрации ГТД // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб. науч. тр. - Куйбышев: КуАИ, 1980. - С. 93-97.
3. Девис, Хеммонд. Сравнение метода преобразования Фурье и параметрических методов идентификации конструкции // Конструирование и технологии машиностроения. - 1984. - Т. 106, № 1. - С. 38-48.
4. Вучков И., Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной регрессионный анализ. - М.: финансы и статистика, 1987. - 239 с.
5. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ. - М.: мир, 1981. - 693 с.
6. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. Преобразования и медианные фильтры / Под ред. Т.С.Хуанга. - М.: Радио и связь, 1984. - 224 с.
7. Тырсин А.Н. Использование медианной фильтрации в вибродиагностике газотурбинных двигателей // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Сб. науч. тр. - Куйбышев: КуАИ, 1988. - С. 72-78.
8. Парзен Э. Перспективы использования функции плотности квантилей для устойчивого оценивания. // Устойчивые статистические методы оценки данных. - М.: Машиностроение, 1984. - С. 198-206.

УДК 621.452.3:534

А.Н.Тырсин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕДИАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ВИБРОДИАГНОСТИКЕ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Медианная фильтрация является методом нелинейной обработки сигналов. Она осуществляется движением некоторой апертуры вдоль дискретизированной последовательности и заменой значения текущего отсчета медианой исходных значений отсчетов внутри апертуры $[I]$. Медианный фильтр $M_2\{x(n)\}$ апертуры L (L - нечетно) определим как

$$y(n) = M(x(n-L+1), \dots, x(n)),$$

где $x(n) = x(n \Delta t)$, $y(n) = y(n \Delta t)$ - n -е отсчеты входной и выходной последовательностей; Δt - интервал дискретизации; $M(\cdot)$ - операция нахождения медианы, например $M(2, 12, 7, 5, 2) = 5$.

Особенностью текущей медианы является то, что она сохраняет резкие перепады в сигнале, если расстояние между ними более $(L+1)/2$ отсчетов, и устраняет случайные выбросы длительностью менее $(L+1)/2$ отсчетов при достаточно высокой степени подавления белого шума [1, 2].

Известно, что выбросигналы, генерируемые некоторыми вращающимися узлами ГД, имеют периодический импульсный характер [3]. Это позволяет с успехом использовать медианную фильтрацию для цифровой обработки указанных сигналов. Рассмотрим несколько типичных примеров.

I. Подавление белого шума. Для импульсных выбросигналов, например пульсаций давления, можно выделить два характерных участка: сигнал постоянного уровня плюс шум, резкий перепад сигнала плюс шум. За оценку степени подавления шума примем изменение его дисперсии.

При сигнале постоянного уровня дисперсия текущей медианы белого шума r с распределением $N(0, \sigma_n^2)$ равна [1]

$$\text{Var} [M(r(n-L+1), \dots, r(n))] \approx \pi \sigma_n^2 / (2L + \pi - 2). \quad (1)$$

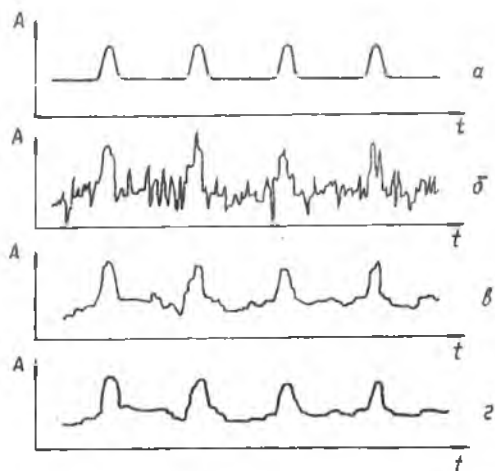
Дисперсия текущего среднего в этом случае

$$\text{Var} [E(r(n-L+1), \dots, r(n))] = \sigma_n^2 / L. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) видно, что текущее среднее подавляет нормально распределенный белый шум несколько эффективнее. При увеличении толщины "хвостов" плотности распределения шума эффективность текущей медианы по сравнению с текущим средним будет значительно возрастать.

Рассмотрим случай резкого перепада сигнала. Здесь медианная фильтрация имеет очевидные преимущества, заключающиеся в более высокой степени подавления шума на перепадах и в сохранении у них резких границ. Исследования на импульсной модели (рис. 1, а)

$$x_K(t) = \begin{cases} A_0 \sin^2 \frac{\pi(t_K - \Delta t_H)}{\Delta t_D}, & 0 < t_K - \Delta t_H < \Delta t_D; \\ 0, & 0 > t_K - \Delta t_H \geq \Delta t_D, \end{cases} \quad (3)$$



Р и с. 1. Пример подавления шума в импульсной последовательности:
 а - импульсная последовательность без шума;
 б - зашумленная импульсная последовательность;
 в - зашумленная импульсная последовательность после однократной медианной фильтрации;
 г - зашумленная импульсная последовательность после трехкратной медианной фильтрации

Степень подавления шума медианной фильтрацией можно повысить за счет ее итеративного применения [1,2]. В этом случае будет наблюдаться заметное уменьшение дисперсии шума при сохранении в сигнале резких перепадов. Скользящее усреднение итерационно применять нельзя, так как это приведет к растеканию импульсов (при большом числе итераций вообще получим последовательность с постоянными значениями). Критерием числа итераций медианной фильтрации можно считать прекращение изменений в сигнале. Процедура подавления шума осуществляется как программно [1], так и аппаратно [2].

Особенностью текущей медианы является наличие небольших случайных перепадов, плоских максимумов и минимумов. Для их сглаживания рекомендуется использовать скользящее усреднение с малой апертурой [1], алгоритм расщепления вершин и впадин [5] и сглаживание остатка [1]. На рис. 1 изображена смесь импульсного сигнала $\alpha_K(t)$ и шума с распре-

достаточно точно аппроксимирующей экспериментальные данные [4], показали высокую эффективность текущей медианы по сравнению с текущим средним при $A_0 > 2,5\sigma_n$ с точки зрения сохранения формы импульсов. В формуле (3) обозначено:

$$t_K = t - (K-1)\Delta T;$$

$$0 \leq t < T, 0 \leq t_K < \Delta T;$$

K - номер импульса;

ΔT - период импульсов;

T - длительность реализации;

Δt_H - сдвиг импульса относительно начала периода;

Δt_T - продолжительность импульса;

A_0 - амплитуда импульса.

делением $N(0, \sigma_n)$ при $A_D = 3\sigma_n$ до (см. рис. I, б) и после однократной (см. рис. I, в) и трехкратной (см. рис. I, г) медианной фильтрации с апертурой $L = 7$. В этом примере $\Delta t_D = 19 \Delta t$, $\Delta t_H = 23 \Delta t$.

2. Подавление импульсного шума. Под импульсным шумом понимается искажение сигнала выбросами с большими положительными или отрицательными значениями и малой длительностью. Условие полного устранения всех выбросов имеет вид

$$2K_c < L < 2K_p, \quad (4)$$

где L - число отсчетов в апертуре фильтра; K_c - максимальная ширина выброса; K_p - минимальное расстояние между выбросами. Скользящее усреднение в данном случае мало приемлемо, так как при этом выбросы не устраняются, а лишь "растекаются" на ближайшие отсчеты. Заметим, что при большой частоте появления в сигнале выбросов только одного знака плотность распределения мгновенных значений становится несимметричной, поэтому вместо текущей медианы рекомендуется использовать другие порядковые статистики: при положительных выбросах - меньшие, а при отрицательных - большие, чем медиана.

В спектрах выбросигналов выбросы являются дискретными спектральными составляющими. Это в большинстве случаев информативные признаки, и отбрасывать их нельзя. Спектр условно можно представить в виде наложения дискретных составляющих и функции, пропорциональной амплитудно-частотной характеристике системы при входном сигнале типа белого шума (назовем оценкой АЧХ), которые часто требуется знать отдельно друг от друга. Оценку АЧХ выделяем медианной фильтрацией отсчетов спектра $S(n)$, $n = 1, \dots, N$ (рис. 2).

Апертура фильтра должна удовлетворять условию (4) и может быть постоянной или переменной (пропорциональной частоте текущего отсчета). Необходимость роста апертуры

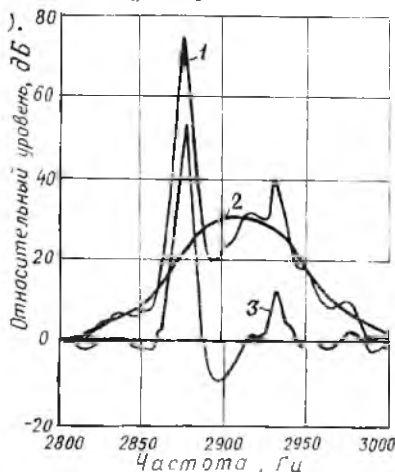


Рис. 2. Разделение участка спектра (линия 1) на непрерывную (линия 2) и дискретную (линия 3) части

обусловлена увеличением ширины полосы дискретной составляющей пропорционально ее частоте из-за флуктуаций частоты вращения ротора и других причин [6]. Обозначим последовательность, полученную после фильтрации, как $h(n)$. Так как АЧХ — гладкая кривая, то последовательность $h(n)$ полезно сгладить рассмотренными выше способами. В результате имеем последовательность $h'(n)$, которую принимаем за оценку АЧХ (см.рис.2). Если в спектре имеются случаи, когда расстояние между дискретными составляющими меньше половины апертюры фильтра, то необходимо использовать итерационную медианную фильтрацию.

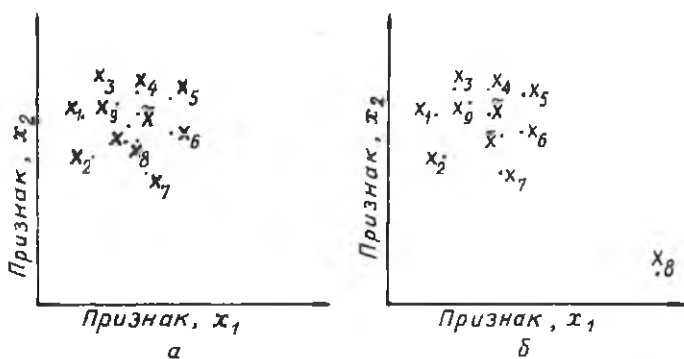
Вытя из $S(n)$ последовательность $h(n)$, получим $d(n)$, представляющую собой смесь дискретных составляющих и отфильтрованного шума (см.рис.2). На рис. 2 приведен пример подобной обработки участка спектра вибросигнала ГТД. Апертюра медианного фильтра в этом случае была равна 11 отсчетам; апертюра линейного фильтра, сглаживающего $h(n)$, составляла 3 отсчета; расстояние между отсчетами 6 Гц.

3. Обнаружение тренда. Пропустив импульсный сигнал со скважностью больше двух через медианный фильтр с апертюрой $L > 2K_n$ (K_n — длительность импульсов в отсчетах), получим кривую тренда. Устранить тренд можно вычитанием из сигнала его текущей медианы, являющейся в данном случае кривой тренда. Если скважность импульсов меньше двух, то используем меньшую, чем медиана, порядковую статистику. Указанное свойство применимо и для неимпульсных вибросигналов. При этом необходимо лишь взять достаточно большую апертюру фильтра.

4. Формирование описания эталонного объекта. При использовании в процедуре диагностирования теории распознавания образов возникает необходимость формирования описания эталонного объекта. Вычисление его в виде арифметического среднего

$$\bar{X} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K X_i \quad (i=1, \dots, K),$$

где X_i — M -мерный вектор диагностических признаков $(x_{1i}, \dots, x_{Mi})^T$ того объекта обучающей выборки, может привести к значительным ошибкам при возникновении дефектов в одном или нескольких объектах. Замена арифметического среднего \bar{X} медианой \tilde{X} позволяет избежать подобных ошибок. Покажем это. Пусть каждый из имеющихся девяти объектов обучающей выборки представлен в диагностическом пространстве двух признаков. Если все объекты имеют идентичное техническое состояние (см. рис.3,а), то векторы \bar{X} и \tilde{X} почти совпадают. Небольшой случай-



Р и с. 3. Формирование описания эталонного объекта в виде арифметического среднего и медианы в пространстве признаков:
 а - при идентичном техническом состоянии объектов обучающей выборки;
 б - при неидентичном техническом состоянии объектов обучающей выборки

ый разброс векторов X_2 закономерен и объясняется наличием технологических погрешностей изготовления объектов. В случае возникновения дефектов в восьмом объекте (см.рис. 3,б) вектор \tilde{X} заметно искажается, тогда как вектор \bar{X} остается практически неизменным.

В ы в о д ы

1. Показана эффективность медианной фильтрации для подавления помех в импульсных вибросигналах.
2. Предложен новый алгоритм разделения АЧХ системы и дискретных спектральных составляющих.
3. Показана возможность использования медианной фильтрации для обнаружения тренда и формирования описания эталонного объекта.

Б и б л и о г р а ф и ч е с к и й с п и с о к

1. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений /Под ред. Т.С.Хуанга. - М.: Радио и связь, 1984. - 224 с.
2. Дмитриев Ю.С., Тырсин А.Н., Гусев В.Г. Об одном способе подавления помех в цифровых трактах оптоэлектронных преобразователей пе-

ремещений //Фотозлектрические и волоконно-оптические преобразователи для систем управления и вычислительной техники: Сб.науч.тр. - Куйбышев: КуАИ, 1986. - С. 124-130.

3. Сидоренко М.К. Исследование диагностических свойств виброакустических сигналов механизмов с вращающимися элементами на основе моделей импульсных процессов //Динамика станков: Тез.докл.Всесоюз.науч.-техн.конф. - Куйбышев, 1980. - С. 277-279.

4. Самойлович Г.С. Возбуждение колебаний лопаток турбомашин. - М.: Машиностроение, 1975. - 228 с.

5. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений. - М.: Мир, 1981. - 696 с.

6. Авраменко А.А., Власов П.П. Влияние флуктуаций частоты вращения ротора на результаты спектрального анализа вибрации //Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб.науч.тр. - Куйбышев, 1977. - Вып.4. - С.117-124.

УДК 621.45-33

Д.Е.Чегодаев, Ф.М.Шакиров, О.П.Мулкин

ДИНАМИКА УПРУГОПОДВЕШЕННЫХ МАСС КЛАПАННЫХ МЕХАНИЗМОВ ПРИ ВИБРАЦИОННОМ ВОЗМУЩЕНИИ

Практика эксплуатации серийной запорной арматуры свидетельствует, что часть дефектов уплотнительных поверхностей агрегатов связана с ударным контактом элементов клапанных уплотнений при раскачке упруго-подвешенных золотников в условиях транспортного вибрационного нагружения. Для предупреждения периодических ударных соприкосновений элементов клапанных уплотнений при перевозках в настоящее время используют соответствующую упаковку, способствующую снижению передаваемой на корпус агрегата вибрации. Но не всегда это дает желаемые результаты, особенно при транспортировании запорной арматуры блочного типа, включающей несколько подпружиненных золотников с различными резонансными частотами. В таких случаях целесообразно применять демпфирование непосредственно подвижных элементов агрегатов.

Одним из способов организации вязкого демпфирования золотников является применение непроточной камеры с дросселирующим элементом на выходе. При отсутствии в агрегате демпфирующего устройства (ДУ) в