



Результаты моделирования пространственной ориентации малых спутников, полученные с помощью компьютерной среды, соответствуют результатам, содержащимся в статье, опубликованной в журнале «Гироскопия и навигация» [1].

### Литература

1 Lyubimov, V.V. Attitude Control of Small Spacecraft with Allowance Made for Failures in the System for Decreasing Angular Momentums of Flywheels / V.V. Lyubimov, V.I. Malyshev, and N.D. Semkin // Gyroscopy and Navigation, Pleiades Publishing. 2013.- Vol. 4, No. 4. - Pp. 216–222.

2 Любимов, В.В. Моделирование законов функционирования магнитных исполнительных органов при ориентации микроспутника по местной вертикали [Текст] / В.В.Любимов, Н.Д.Семкин, В.И.Мальшев //Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Том.15, № 1.- С.103- 108.

3 Белецкий, В.В. Вращательное движение намагниченного спутника [Текст] / В.В.Белецкий, А.А.Хентов. - М.: Наука, 1985. -288 с.

4 Коваленко, А.П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами [Текст] / А.П. Коваленко. - М.: Машиностроение, 1975. - 248 с.

5 Овчинников, М.Ю. Исследование алгоритма трёхосной маховичной системы ориентации [Электронный ресурс] / М.Ю. Овчинников, С.С. Ткачев // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. - 2010. № 25. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-25>.

Н.В. Мясникова, М.П. Берестень, М.О. Печенов

## МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НА ОСНОВЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

(Пензенский государственный университет)

Модальный анализ колебаний является эффективным экспериментальным методом определения динамических характеристик объектов на основе результатов измерений и анализа колебаний. Операционный модальный анализ позволяет провести анализ, используя только выходной отклик. Моды получают в результате расчета параметров:

$$y(t) = \sum_{i=1}^p U_i e^{\alpha_i |t|} \cdot e^{j(2\pi f_i t + \varphi_i)} \quad (1)$$

Для определения параметров сигналосложной формы вида чаще всего применяется процедура Прони. Вещественный процесс моделируется комплексно-сопряженной парой  $e^{j(2\pi f_i t + \varphi_i)}$  и  $e^{-j(2\pi f_i t + \varphi_i)}$ . Здесь  $p$  - порядок модели;  $U_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $f_i$ ,  $\varphi_i$  - параметры колебательного звена (соответственно - амплитуда собственных колебаний, коэффициент затухания, собственная частота и запаздывание). Очевидно, что модель является универсальной для измерительных процедур, так как могут быть описаны постоянная



составляющая, экспоненциальная составляющая, «чистый» тон и убывающие или нарастающие колебания и любая комбинация перечисленных компонент.

Сигнал является носителем информации об объекте, и по изменению параметров можно судить об изменении состояния объекта, возникновении и развитии неисправностей, отказах, сбоях.

Предложено определять параметры модели (1) по эмпирическим модам, т.е. эмпирические моды служат основой для вычисления собственных частот, декрементов затухания, что сводит сложную задачу высокого порядка к нескольким простым – определению параметров второго порядка.

Авторами используется предварительное разложение на моды (знакопеременные составляющие) с последующим определением параметров составляющих. В основе разложения лежит адаптивная полосовая фильтрация [1, 2]. По экстремальным значениям  $x_{\sigma_i}$  в моменты  $t_{\sigma_i}, i=1..K$  производится сглаживающие оператором вида

$$x_{ci} = 0,25x_{\sigma_{i-1}} + 0,5x_{\sigma_i} + 0,25x_{\sigma_{i+1}}, \quad (2)$$

что соответствует пропусканию через цифровой фильтр нижних частот с передаточной функцией

$$G(f) = 0,5(1 + \cos(2\pi f\Delta)),$$

где  $\Delta$  – среднее расстояние между экстремумами.

Выделяется знакопеременная составляющая

$$x_{pi} = -0,25x_{\sigma_{i-1}} + 0,5x_{\sigma_i} - 0,25x_{\sigma_{i+1}}, \quad (3)$$

что соответствует пропусканию через цифровой фильтр верхних частот с передаточной функцией

$$G(f) = 0,5(1 - \cos(2\pi f\Delta)).$$

Действия (2), (3) повторяются над составляющей  $x_{ci}$ , пока она не станет знакопеременной или число экстремумов будет меньше 3-х.

По количеству экстремумов и значениям экстремумов вычисляются параметры составляющих:

$$f_i = \frac{K_i}{2T}, \quad \sigma_i = std(x_{\sigma_i}).$$

Так как расстояние  $\Delta$  на каждом шаге увеличивается, то фильтры (3) – полосовые по отношению к диапазону, определяемому шагом дискретизации  $F = \frac{1}{2\Delta t}$ . Фильтр адаптивный, так как величина  $\Delta$  зависит от расстояния между экстремумами на каждом шаге.

Параметры разложения (частоты и мощности) каждой составляющей сигнала характеризуют модель объекта в текущий момент времени:

$$S_i = \begin{bmatrix} \bar{f}_{i1}, \bar{f}_{i2}, \dots, \bar{f}_{ip} \\ \sigma_{i1}^2, \sigma_{i2}^2, \dots, \sigma_{ip}^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$



где  $\bar{f}_{ij}$  – значения центральной частоты  $j$ -й компоненты на  $i$ -м участке (при анализе в скользящем окне);  $\sigma_{ij}^2$  – значения мощности  $j$ -й компоненты на  $i$ -м участке;  $p$  – количество компонент.

Зависимость  $\sigma(f)$  характеризует спектр мощности в текущий момент времени, а  $\sigma(f(t), t)$  – время частотное распределение.

Совершенствование алгоритма экстремальной фильтрации с дополнительным центрированием выделенных составляющих позволило по модам определять параметры модели (1).

В работе [3] для снижения трудоемкости пропорционально порядку было предложено применять процедуру Прони не к сигналу, а к его знакопеременным составляющим, выделенным экстремальным фильтром, что позволяет заменить одну процедуру порядка  $p$  простыми задачами оценивания параметров составляющих первого и второго порядков.

Если не требуется высокая точность и более важными являются временные ограничения, то параметры составляющих сигнала (амплитуды и затухания) могут быть определены в точках экстремумов  $\ln(x_{\text{сост.}}) = \ln(|U|) - \alpha t$ , а частота, как уже отмечалось, определяется по числу экстремумов. Еще один параметр (фаза  $\varphi_i$ ) определяется первым экстремумом  $t_{31}$  каждой составляющей. Таким образом, определены все параметры модели (1), и появляется возможность уточнить модель (4):

$$S_i = \begin{bmatrix} \bar{f}_{i1}, \bar{f}_{i2}, \dots, \bar{f}_{ip} \\ U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{ip} \\ \alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{ip} \\ \varphi_{i1}, \varphi_{i2}, \dots, \varphi_{ip} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Параметры узкополосных составляющих модели (5) характеризуют спектр в текущий момент времени и позволяют получить аппроксимацию сигнала и его спектр на любом участке. При этом спектр сигнала может быть вычислен по формуле

$$G(j\omega) = \sum_{m=1}^p A_m e^{j\varphi_i} \frac{\omega_m}{(\alpha_m + j\omega)^2 + \omega_m^2}. \quad (6)$$

На рисунке приведен пример применения экспресс-анализа в системах сейсмических наблюдений. Происходит изменение параметров всех составляющих при переходе от сейсмофона к сейсмовозмущению, проявляющееся в том, что в области обнаружения частоты составляющих падают, а амплитуды возрастают.

Фазы не являются информативными параметрами, они нужны, чтобы правильно сложить моды.

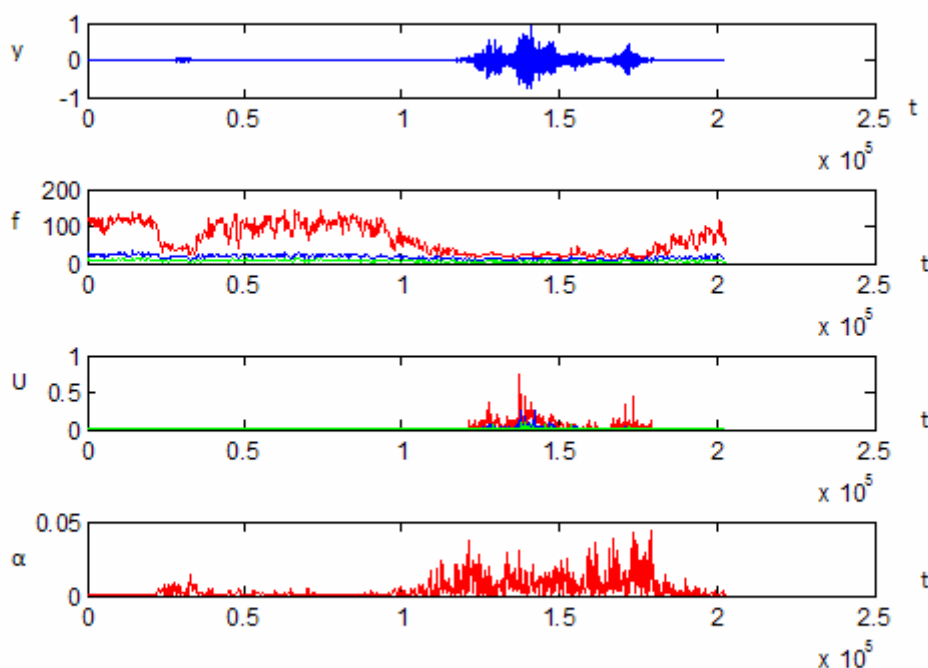


Рис. 1. Сейсмический сигнал и его диагностические признаки:  
верхний график – сеймосигнал  $y$  (в размерных единицах),  
второй третий и четвертый – частоты  $f$  (Гц), амплитуды  $U$  (в размерных  
единицах) и модуль затухания (в относительных единицах).

На рисунке показаны дальний и ближний проезды автомобиля. Видно, что изменение частот всех составляющих четко указывает зону обнаружения, амплитудный признак не выделяет дальний автомобиль, а затухание высокочастотной составляющей существенно возрастает в зоне обнаружения.

Параметры модели могут быть использованы как диагностические признаки, при этом в качестве основного диагностического признака целесообразно использовать именно частоты составляющих, так как тенденция изменения частотного признака более выражена. Двукратное уменьшение частоты составляющей при сейсмозвущении обнаруживается при отношении сигнал/шум, большем 3, а существенное увеличение амплитуды – при отношении сигнал/шум, большем 30. Применение модели (5) дает еще один диагностический признак – затухание, который четко указывает зону обнаружения.

Возникает вопрос, какой параметр целесообразнее использовать в системе обнаружения. Проведем эксперимент. Выберем участок, соответствующий шуму, двигаясь скользящим окном вдоль реализации, будем определять параметры составляющих на каждом участке и построим зависимость изменения каждого из информативных параметров от отношения



сигнал/шум – среднеквадратичного отклонения (СКО) на текущем участке к СКО шума. Результаты моделирования представлены на рисунках 2–4.

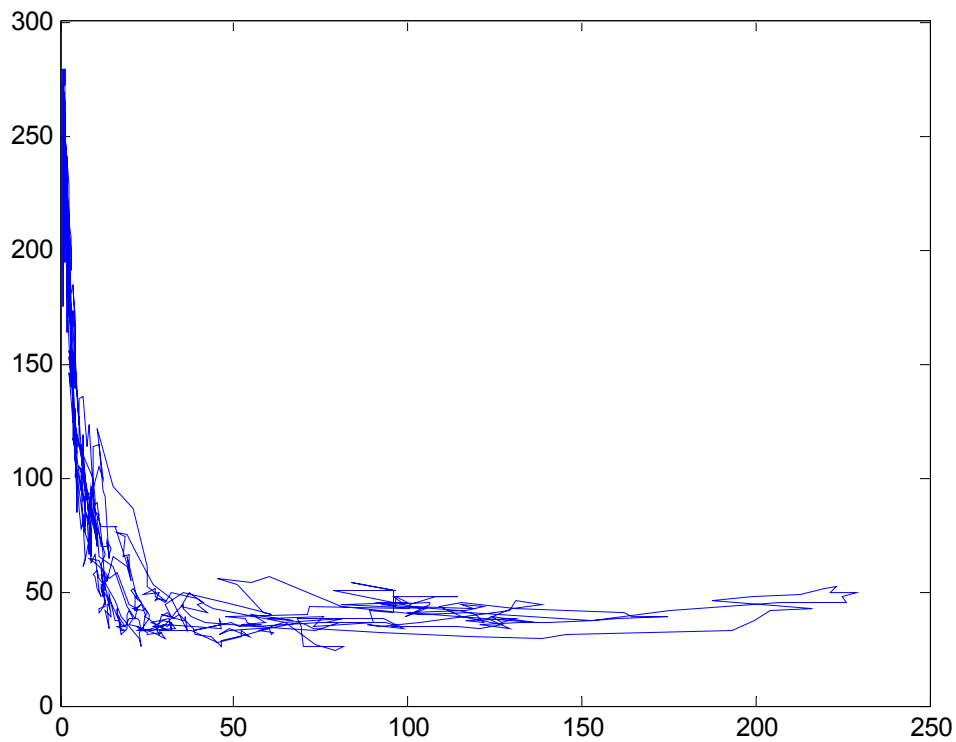


Рис. 2. Зависимость частоты высокочастотной составляющей от отношения сигнал/шум

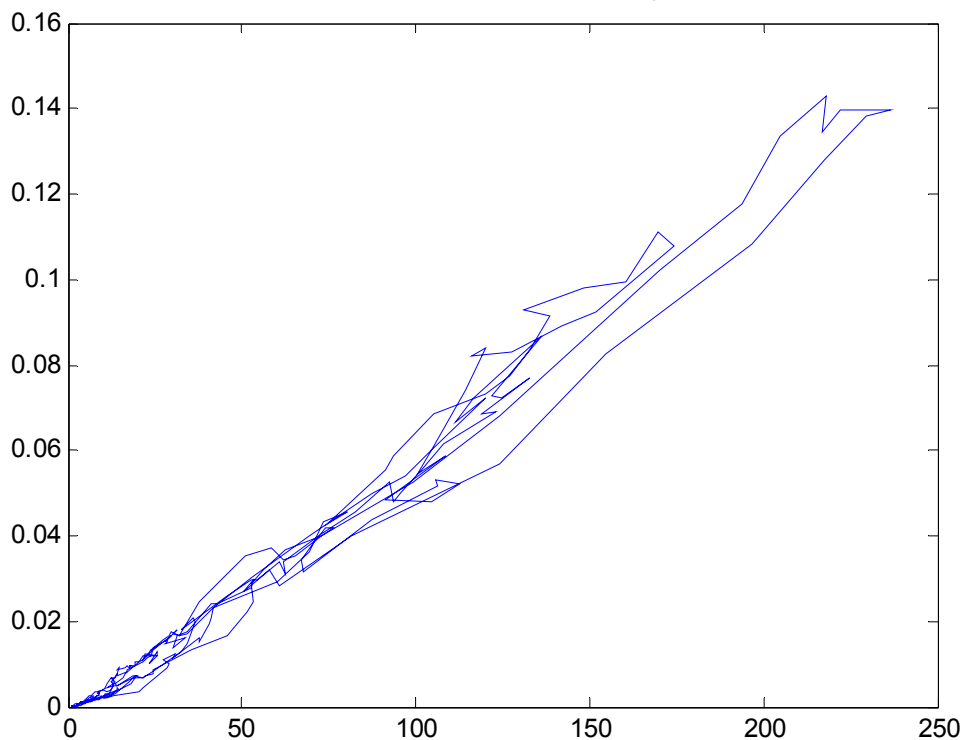


Рис. 3. Зависимость амплитуды высокочастотной составляющей от отношения сигнал/шум

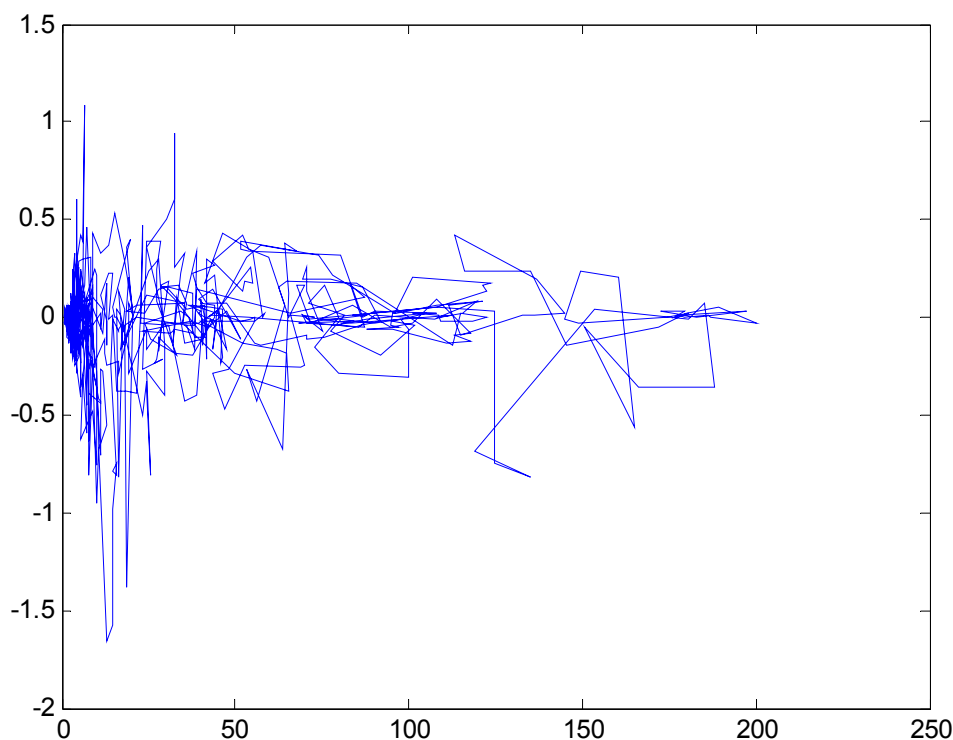


Рис. 4. Зависимость коэффициента затухания высокочастотной составляющей от отношения сигнал/шум

Из рисунков видно, что частота на участке обнаружения практически не изменяется (рисунок 2), а амплитуда пропорциональна отношению сигнал/шум, т.е. зависит от расстояния (рисунок 3). Затухание высокочастотной составляющей незначительно при малом отношении сигнал/помеха, а при переходе к сейсмозмущению существенно возрастает (рисунок 4).

Из рисунка 1 видно, что обнаружение раньше происходит по затуханию, его существенное увеличение сопровождается проездом автомобиля. Но затухание, в отличие от частот меняется от участка к участку и определяется с большей погрешностью. Очевидно, более информативна комбинация частоты и затухания моды. Причем достаточно использовать самую высокочастотную составляющую.

В [4] уже использовался нейросетевой обнаружитель на основе многослойных сетей, где в качестве входов использовались частоты составляющих и отношение амплитуды к частоте. Недостатком является зависимость значений амплитуды от расстояния до источника сейсмозмущения. Предлагается использовать в качестве входов сети именно частоты и затухания.

За счет простоты алгоритма экстремальной фильтрации и малой вычислительной трудоемкости появляется возможность строить системы диагностики и распознавания реального времени.

Исследования проводятся при поддержке гранта РФФИ 14-08-01065.



### Литература

1. Мясникова, Н. В. Экстремальная фильтрация и ее приложения / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень // Датчики и системы. – 2004. – № 4. – С. 8–11.
2. Мясникова, Н.В. Методы разложения сигналов на основе экстремальной фильтрации / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень, Л. А. Долгих // Датчики и системы. – 2011. – № 2. – С. 8–12.
3. Мясникова, Н. В. Применение разложения по эмпирическим модам в задачах цифровой обработки сигналов / Н. В. Мясникова, Л. А. Долгих, М. Г. Мясникова // Датчики и системы. – 2011. – № 5. – С. 8–10.
4. Зенов, А. Ю. Применение нейросетевых алгоритмов в системах охраны периметра / А. Ю. Зенов, Н. В. Мясникова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3. – С. 15–24.

А.Н. Полушин, А.О. Дмитриев, И.И. Ханнанов

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ РАСКРЫТИЯ СОПЛА

(Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ)

Принцип работы центробежной форсунки состоит в том, что жидкость, получившая интенсивное вращение в камере закручивания, вытекает из сопла в виде тонкой пленки, образующей полый конус. Пленка под влиянием окружающей газовой среды и других возмущений распадается на капли. Центробежные форсунки используются в энергетике, при сжигании жидкого топлива в камерах сгорания ГТД, в пожаротушении и др.

Первая работоспособная форсунка для сжигания жидкого топлива была предложена А. И. Шпаковским в 1864 г. В дальнейшем большую роль сыграла форсунка, созданная в 1880 г. инж. В. Г. Шуховым. Также свой вклад в экспериментальное исследование ЦБФ сделал Ю.И. Хавкин.[1] Теория идеальной центробежной форсунки, базирующаяся на принципе максимального расхода, разработана Г. Н. Абрамовичем. Несколько позже к аналогичным результатам пришли Л. С. Клячко, Д. Тейлор и К. Баммерт.[1]

Характер воздействия различных факторов (скорость истечения жидкости, толщина пленки, плотность газовой среды, физические свойства жидкости) на мелкость распыла в центробежных форсунках отличается от характера воздействия этих же факторов на мелкость распыла в струйных форсунках.[1]

Это связано с тем, что толщина пленки, создаваемой центробежной форсункой, убывает по мере удаления от соплового отверстия (пленка представляет собой полый конус) и др. [1]

Влияние вязкости в случае центробежных форсунок несколько слабее, чем при распыливании струйной форсункой. [1]