

Прошунин Николай Николаевич
Шачков Марк Олегович

Идентификация колебательных процессов в
нежестких элементах макета малого спутника

- В конструкции некоторых космических аппаратов могут использоваться нежесткие элементы (антенны, спутниковые панели).
- При управлении ориентацией необходимо учитывать колебания возникающие в этих элементах.
- Одним из методов определения основных характеристик колебания (частот, амплитуд) является непосредственная видеосъемка нежесткого элемента и последующая обработка видеопотока.

- Будем исходить из предположения, что влияние колебаний нежесткого элемента на динамику ориентации сводится к некоторой силе приложенной к телу в точке крепления элемента.
- Величина этой силы - функция от характеристик колебательного процесса.
- Разделим задачу на две подзадачи: определение характеристик колебания и восстановление силы по полученным характеристикам.

- Разработать алгоритм обработки видеопотока с целью выделения ключевых точек колеблющегося элемента (балки).
- Разработать алгоритм определения характеристик колебательного процесса с использованием информации полученной в процессе обработки видеопотока.
- Сравнить полученные характеристики колебаний с результатами конечно-элементного моделирования.

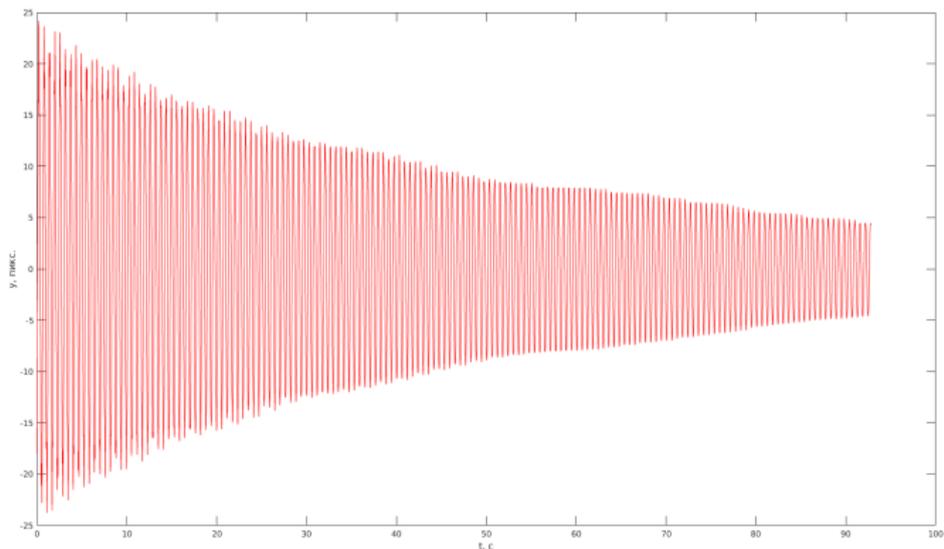
- Ключевые точки на балке - промежутки между светлыми пятнами.
- Для каждого пикселя на кадре необходимо с высокой степенью уверенности ответить на вопрос принадлежности ко множеству ключевых точек.
- Напрашивающееся решение - произвести бинаризацию и отсеять лишнее.

Алгоритм обработки кадра:

- Обрезать части кадра в которых балка не может присутствовать (какие именно - известно заранее).
- Перевести изображение в градации серого (необходимо для бинаризации).
- Применить свёртку с Гауссовым ядром (размытие) для очистки от шумов.

- Произвести бинаризацию с заранее выбранным порогом (отличающимся для разных частей кадра).
- На бинаризованном изображении произвести выделение контуров.
- Если количество найденных контуров не соответствует количеству ключевых точек - отсеять кадр.
- Найти координаты центра (как взвешенную сумму) для каждой из областей ограниченных контурами.

- Данные - пиксельные координаты ключевых точек балки.
- Предполагаем только плоские колебания - будем проводить идентификацию рассматривая зависимость координаты y от времени.



По форме колебаний можно предположить, что в нашем случае применима следующая модель:

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^n A_{ij} \cos(\omega_j t + \psi_j) e^{-\alpha_j t}, \quad i = \overline{1, k}.$$

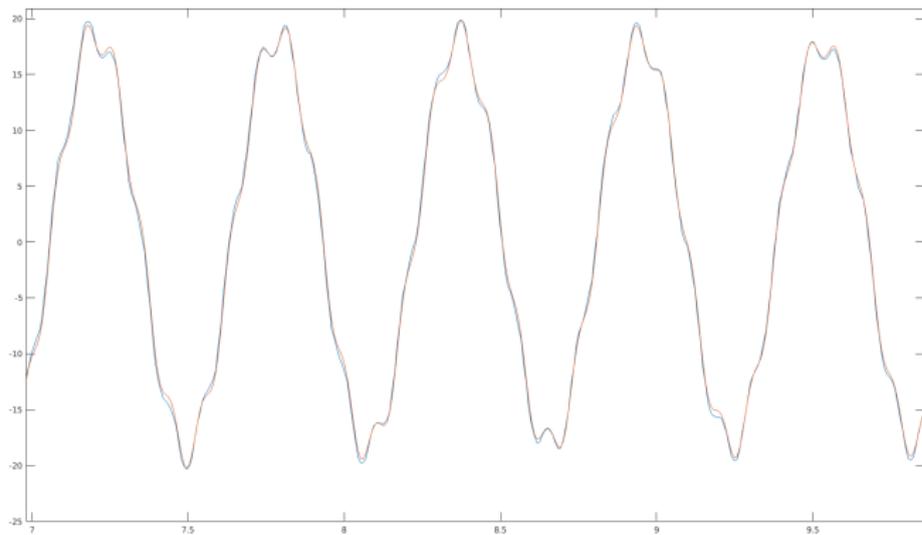
Рассмотрены два подхода к определению параметров для данной модели:

- НМНК используя весь набор данных.
- Расширенный фильтр Калмана.

- Минимизируемый функционал невыпуклый - необходимо хорошее начальное приближение.
- Применяем преобразование Фурье чтобы найти максимумы в спектре исходного колебания и используем их в качестве начальных приближений (1.71 Гц и 10.8 Гц).
- Для первого видео использована модель с двумя частотами, для второго - с одной (конструкция макета не позволяет возбудить вторую частоту).

- В результате оптимизации удалось успешно найти параметры предложенной модели.
- Максимальное значение RMSE (в пикселях) среди ключевых точек для первого видео составляет 2.2, для второго - 1.73.
- Коэффициент затухания второй частоты в 6 раз меньше чем первой.

Обработка данных. НМНК. Пример.



Будем использовать следующие обозначения:

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_k \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ \vdots \\ A_{kn-1} \\ A_{kn} \end{pmatrix},$$

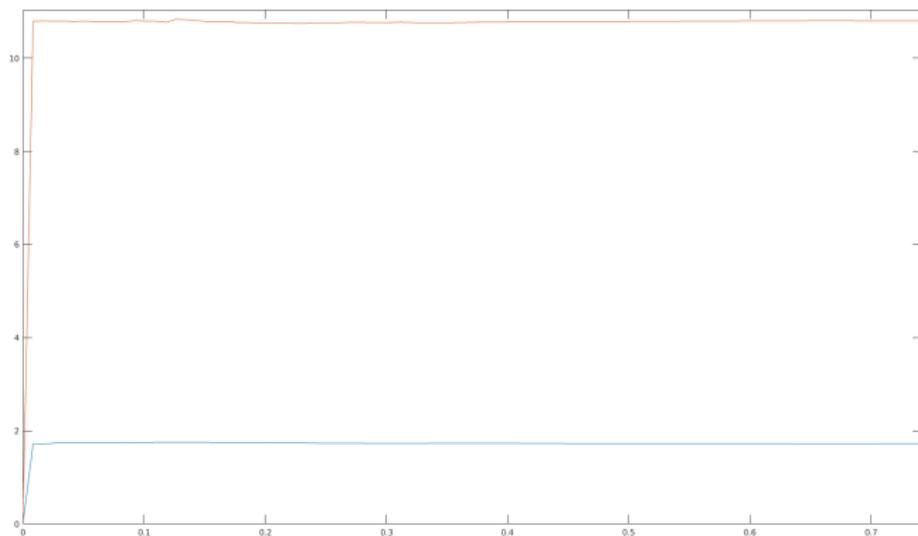
$$\omega = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_n \end{pmatrix}, \quad \psi = \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_n \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} A \\ \omega \\ \psi \\ y \end{pmatrix}.$$

Динамическая система соответствующая нашей модели (без учёта затухания):

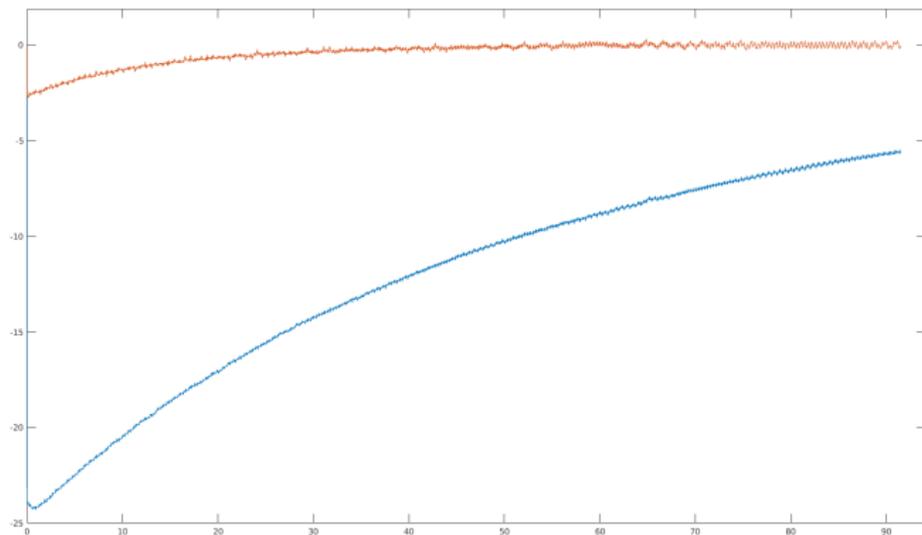
$$\dot{x} = \begin{pmatrix} O_{kn \times 1} \\ O_{2n \times 1} \\ f(x, t) \end{pmatrix}, \quad f(x, t) = \begin{pmatrix} f_1(x, t) \\ \vdots \\ f_k(x, t) \end{pmatrix},$$

$$f_i(x, t) = - \sum_{j=1}^n A_{ij} (\omega_j \sin(\omega_j t + \psi_j)), \quad i = \overline{1, k}.$$

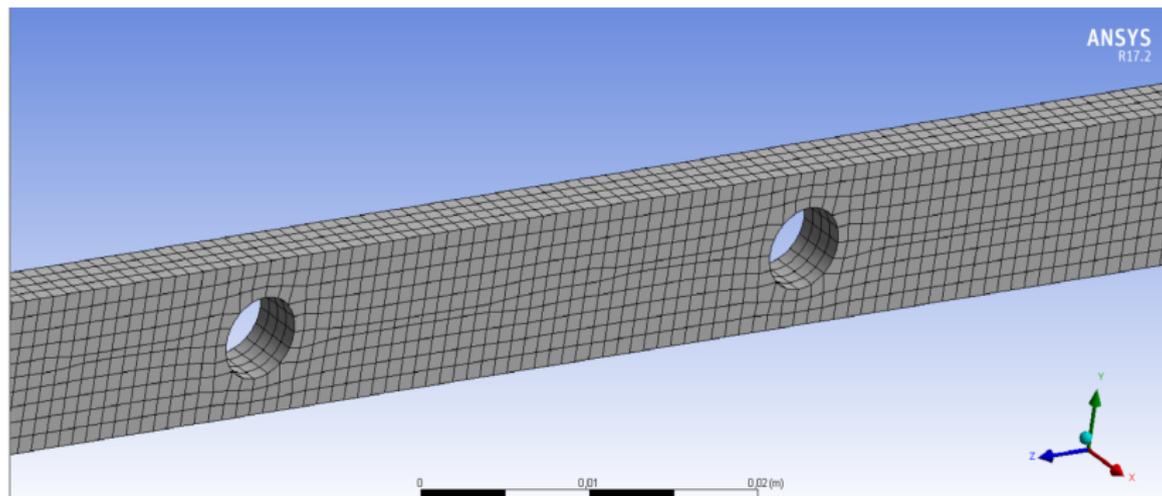
Графики частот при обработке первого видео.



Графики амплитуд при обработке первого видео.



Было проведено конечно-элементное моделирование в среде ANSYS (с использованием подсистемы Modal Analysis).



Первые три частоты: 1.5946 Гц, 4.5829 Гц, 9.9924 Гц. Первая и третья соответствуют колебаниям в горизонтальной плоскости и сопоставимы с частотами определёнными в ходе натурального эксперимента. Разницу частот можно объяснить отличием реальных параметров от модельных значений и неидеальным закреплением балки при моделированием.

Деформация соответствующая первой частоте:

Деформация соответствующая третьей частоте:

- Предложенный алгоритм обработки видеоизображения позволяет определять положения ключевых точек нежесткого элемента.
- Последующая обработка полученных пикселных координат позволяет определить качественные характеристики колебательного процесса.
- Результаты согласуются с конечно-элементным моделированием.

- Улучшить алгоритм обработки видео с целью увеличения качества определения и обеспечения устойчивости в независимости от фона изображения.
- Рассмотреть возможность применения других моделей, позволяющих качественней определять характеристики колебания.

- Перейти к идентификации непосредственного влияния колебаний на динамику ориентации - установить форму зависимости силы возникающей в точке крепления балки от характеристик колебания (используя тензодатчик).