

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕДУРЫ СУБПИКСЕЛЬНОГО ТРЕКИНГА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ МОРЯ В БУХТЕ ЗОЛОТОЙ РОГ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВИДЕОТРАНСЛЯЦИЙ

Фищенко В.К., Гончарова А.А., Голик А.В., Зимин П.С.

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток
fischenko@poi.dvo.ru*

Трекингом называют процедуру отслеживания координат движущегося объекта на видеозаписи либо видеотрансляции. Она применяется во многих задачах технического зрения, в системах безопасности, а также в научных приложениях, например, в задачах исследования Земли из космоса. В океанографии она может быть использована для измерения временных сигналов волнения и колебаний уровня моря в заданных точках акватории на основе отслеживания вертикальных перемещений в поле видеокadra сравнительно легких и контрастных объектов (маркеров) на поверхности воды.

Существует большое число реализаций процедуры трекинга. Наиболее простой и часто используемой является процедура корреляционного трекинга. Пусть имеются анализируемое изображение $I(x, y)$, $(x, y) \in D_I$ и эталонное изображение (образец) $T(x, y)$, $(x, y) \in D_T$, заданные в прямоугольных областях $D_I = [D_{Ix} \times D_{Iy}]$, $D_T = [D_{Tx} \times D_{Ty}]$, $D_T \subset D_I$. Необходимо найти точку (x^*, y^*) , указывающую на анализируемом изображении место, где оно наиболее коррелировано с эталонным изображением.

$$(x^*, y^*) = \arg \max_{(x,y) \in D_I} K_{IT}(x, y), \quad (1)$$

где $K_{IT}(x, y)$ – корреляционная функция

$$K_{IT}(x, y) = \frac{1}{D_{T_x} D_{T_y}} \iint_{(u,v) \in D_T} I(x+u, y+v) T(u, v) dudv, \quad (x, y) \in D_I. \quad (2)$$

На практике, например, при анализе цифрового видео, анализируемое и эталонное изображения представляются в виде матриц пикселей, полученных дискретизацией исходных непрерывных по пространственным координатам изображений с некоторым достаточно малым шагом Δ :

$$\begin{aligned} I(i, j) &= I(x_i = i \cdot \Delta, y_j = j \cdot \Delta), i = \overline{0, N_{I_x} - 1}, j = \overline{0, N_{I_y} - 1}; \\ T(i, j) &= T(x_i = i \cdot \Delta, y_j = j \cdot \Delta), i = \overline{0, N_{T_x} - 1}, j = \overline{0, N_{T_y} - 1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Обычно, величина шага (линейный размер пикселя) Δ в видеокамерах удовлетворяет условиям теоремы отсчетов Котельникова: частота Найквиста $f_{\text{Nyquist}} = \frac{1}{2\Delta}$ больше максимальной ненулевой частоты f_{max} в спектрах формируемых оптической системой камеры изображений $I(x, y), T(x, y)$. Это потенциально дает возможность точно восстановить исходные непрерывные изображения по их дискретным версиям (3).

При работе с дискретными изображениями задача корреляционного трекинга сводится к расчету дискретной корреляционной функции (кросс-корреляционной последовательности)

$$\begin{aligned} K_{IT}(i, j) &= \frac{1}{N_{T_x} N_{T_y}} \sum_{k=0, l=0}^{N_{I_x}-1, N_{I_y}-1} I(i+k, j+l) \times T(k, l), \\ i &= \overline{0, N_{I_x} - N_{T_x}}, \quad j = \overline{0, N_{I_y} - N_{T_y}} \end{aligned} \quad (4)$$

и нахождению в ней точки (i^*, j^*) с максимальным значением:

$$(i^*, j^*) = \arg \max_{(i, j)} K_{IT}(i, j). \quad (5)$$

Для ускорения расчетов кросс-корреляционной последовательности вместо формулы (4) используют схему с переходом в частотную область и использованием процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ) для расчета дискретных преобразований Фурье (ДПФ).

Шаг 1. Дополнение изображений $I(i, j), T(i, j)$. (3) нулями до размеров: $N_x = N_{I_x} + N_{T_x}, N_y = N_{I_y} + N_{T_y}$, расчет их ДПФ :

$$\begin{aligned} \tilde{I}(k, l) &= \text{ДПФ}(I(i, j)), \quad \tilde{T}(k, l) = \text{ДПФ}(T(i, j)), \\ k &= \overline{0, N_x - 1}, l = \overline{0, N_y - 1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Шаг 2. Комплексно сопряженное перемножение полученных ДПФ (расчет дискретного взаимного спектра $S_{IT}(k, l)$)

$$S_{IT}(k, l) = \tilde{I}(k, l) \times \tilde{T}^*(k, l), \quad k = \overline{0, N_x - 1}, l = \overline{0, N_y - 1}. \quad (7)$$

Шаг 3. Расчет кросс-корреляционной последовательности с использованием процедуры обратного преобразования Фурье

$$K_{IT}(i, j) = \text{ОДПФ}(S_{IT}(k, l)), \quad i = \overline{0, N_x - 1}, j = \overline{0, N_y - 1}. \quad (8)$$

Описанная процедура корреляционного трекинга применяется в составе инструмента Корреляция в программе экспресс анализа изображений и видео QAVIS [1]. Для измерения сигналов морского волнения и колебаний уровня моря пользователь фиксирует на видео начальный кадр с маркерным объектом на поверхности воды, после чего на каждом новом видеокадре находится и записывается в выходной файл смещение маркера в пикселях относительно его первоначального положения. Вертикальная компонента смещения представляет собой оценку сигнала волнения, как функции изменения высоты уровня воды в пикселях в исследуемой точке $h(t)$. Для масштабной привязки сигнала волнения должен быть так или иначе оценен размер одного пикселя видеокадра Δ в плоскости расположения маркера. Это можно сделать, если известны т.н. внутренние и внешние параметры камеры, а также расстояние до маркера. Также оценку Δ можно получить, если в плоскости расположения маркера измерить линейный размер в пикселях какого-нибудь тестового объекта, длина которого в метрической шкале известна. Окончательно, реальный сигнал волнения $H(t) = \Delta \times h(t)$ программой QAVIS измеряется с дискретностью по оси значений Δ метров (сантиметров, миллиметров). В зависимости от характеристик разрешения камеры и расстояния до маркерного объекта в реально выполненных нами измерениях размер пикселя Δ составлял от нескольких единиц миллиметров до десятков сантиметров.

Во многих случаях пиксельная точность недостаточна. Например, некоторые потенциально перспективные для измерений колебаний уровня моря объекты (например, большие круизные суда у причалов), претерпевают в течение суток очень незначительные вертикальные перемещения, порядка 2-3 пикселей. При измерении колебаний уровня моря в местах с сильно выраженными приливными компонентами, даже при относительно большом размахе вертикальных перемещений маркера, порядка 10-15 пикселей, возникают артефакты, существенно осложняющие интерпретацию результатов. На почти линейных участках максимального роста или уменьшения уровня моря возникают заметные горизонтальные ступеньки, следующие почти периодически друг за другом. Это приводит к появлению в спектрах сигналов ложных частотных компонент в диапазоне сейшевых колебаний (периоды порядка десятков минут), которые сложно отделить от реальных сейшевых колебаний.

В литературе достаточно давно обсуждается проблема субпиксельного разрешения в связи с различными задачами обработки изображений и видео. В частности актуальна проблема реализации цифрового

увеличения («зума») изображений в сетевых IP-камерах после достижения предельного оптического увеличения. Цифровой зум, например в 10 раз, реализуется путем интерполяции исходной матрицы пикселей в 10 раз более подробную сетку отсчетов путем применения тех или иных алгоритмов интерполяции. Шаг между отсчетами этой новой сетки 0.1 пикселя. Хотя формально различные виды интерполяции не добавляют новой информации, визуальное восприятие пользователем таких зумированных изображений, понимание запечатленных в них сюжетов существенно зависят от вида интерполяции – кусочно-постоянной, билинейной, бикубической, сплайновой и т.д. При выборе для реализации цифрового зума нужного типа интерполяции производители камер помимо предпочтений потенциальных пользователей принимают во внимание сложность реализации и скорость выполнения процедуры интерполяции. Нами в работе [1] представлены примеры применения различных схем интерполяции потокового видео для улучшения характеристик корреляционного трекинга движений маркерных объектов на поверхности моря. Наилучшие результаты с учетом качества и скорости выполнения показала бикубическая интерполяция.

По-видимому, важным объективным критерием качества субпиксельной интерполяции цифрового изображения $I(i, j)$ является точность воспроизведения в интерполированных точках значений исходного непрерывного по пространственным координатам изображения $I(x, y)$. Если считать выполненными вышеупомянутые условия теоремы отсчетов для примененной в камере схемы дискретизации исходного изображения, то для его точного восстановления в любой точке (x, y) может быть использована интерполяционная формула Котельникова. Последняя вычислительно трудоемка, поэтому на практике для получения сразу всех точных отсчетов изображения $I(x, y)$ в q раз более подробной субпиксельной сетке отсчетов применяют следующую процедуру. Сначала рассчитывают ДПФ исходного цифрового изображения, потом его расширяют в q раз путем добавления нулевых отсчетов за пределами частоты Найквиста. Затем рассчитывают обратное ДПФ.

Очевидно, что при использовании в схеме расчета кросскорреляционной последовательности (6-8) интерполированных описанным выше образом изображений будет обеспечено точное восстановление исходной непрерывной корреляционной функции $K_{IT}(x, y)$ в субпиксельной сетке отсчетов. Это при заданном коэффициенте интерполяции q обеспечит наилучшее качество оценивания положения максимума корреляции, и соответственно, лучшее качество трекинга объектов, по сравнению с алгоритмами, основанными на других методах интерполяции исходных цифровых изображений в субпиксельную сетку отсчетов.

Однако такого же результата можно достичь более экономным образом, без предварительной интерполяции исходных изображений. Нужно на шаге 3 расширить в q раз путем добавления нулевых значений за пределами частоты Найквиста дискретный взаимный спектр $S_{IT}(k, l)$. В результате применения к последнему процедуры обратного ДПФ будут получены точные значения корреляционной функции $K_{IT}(x, y)$ в субпиксельной сетке отсчетов. Заметим, что для поиска субпиксельного максимума корреляционной функции достаточно просмотреть $q \times q$ ее отсчетов вблизи «однопиксельного» максимума (5): $(i^* \times q, j^* \times q^*)$. Поэтому вместо процедуры БПФ, рассчитывающей сразу все отсчеты субпиксельной корреляционной функции, можно применить стандартную процедуру ДПФ для расчета только этих $q \times q$ отсчетов.

В начале 2023 года в программу QAVIS была встроена описанная выше процедура субпиксельного трекинга и с ее помощью проведены измерения колебаний уровня моря в ряде районов побережья Мирового океана на основе анализа видеотрансляций с прибрежных IP-камер. Результаты сравнения полученных сигналов с данными близкорасположенных станций Глобальной сети наблюдений уровня моря GLOSS подтвердили высокую эффективность новой процедуры.

В июне 2023 г. были выполнены подобные измерения в бухте Золотой Рог во Владивостоке с использованием видеотрансляций с городских IP-камер. К сожалению, почти все камеры работают нестабильно, поэтому не удалось получить длительные непрерывные записи сигналов волнения, реальная длительность составляла, обычно, несколько часов. Результаты QAVIS-измерений сравнивались с данными измерителя уровня моря, установленного Примгидрометом в бухте недалеко от Золотого моста. Ранее этот измеритель входил в международную систему GLOSS, в настоящее время он является компонентом Российской системы предупреждения о цунами, данные уровневых измерений с него представляются на сайте этой организации www.RTWS.ru.

На рис. 1 демонстрируется процесс QAVIS-измерений колебаний уровня моря на видеотрансляции панорамного вида на Центральную площадь Владивостока. Трансляция организована интернет-провайдером «Владлинк»: vladlink.ru/city-cams-vdk. С помощью инструмента Корреляция регистрируются вертикальные движения стоящего на причале парома «Босфор Восточный», применяется режим субпиксельного трекинга с коэффициентом $q=100$. Расстояние от камеры до парома около 220 м.

На рис. 2а вверху представлена запись измеренного в пикселах уровневого сигнала, полученного с использованием процедуры субпиксель-



Рис. 1. Процесс субпиксельных измерений колебаний уровня на видеотрансляции

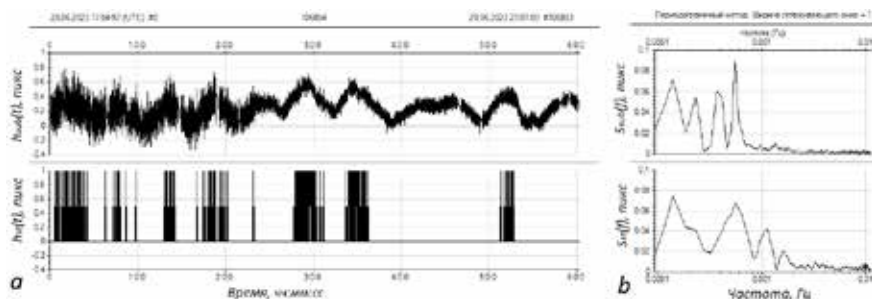


Рис. 2. Осциллограммы (а) и спектры (б) измеренных в пикселях сигналов колебаний уровня моря, вверху – с применением субпиксельного трекинга, внизу – стандартного.

ного трекинга (размер субпикселя = 0.01 пикселя). Время измерений: – 29 июня 2023 г. с 17:04 до 23:04 (UTC), длительность записи 6 часов. Частота временной дискретизации сигнала 5 Гц.

На рис. 2а внизу представлен сигнал, который был бы получен с помощью стандартной процедуры трекинга (в данном случае он рассчитан путем квантизации субпиксельного сигнала по уровню с шагом 1 пиксель). Видно что «стандартный» сигнал может принимать только два значения - 0 и 1 пиксель, т.е. размах колебаний паром в поле видеокадра

за шесть часов наблюдений составлял всего лишь 1 пиксель. Очевидно, что применение субпиксельного трекинга принципиально улучшило визуальное представление сигнала колебаний уровня моря. Фурье-спектры сигналов тоже очень сильно различаются, и предпочтение, очевидно, также следует отдать «субпиксельному». В нем справа налево видны пики периодичностей 12 мин (небольшой, но заметный пик), 30 мин, 45 мин, 1 час 30 мин. Эти периоды близки к ранее установленным исследователями периодам сейшевых колебаний в бухте Золотой Рог. Самый левый пик с периодом около 2.5 часов не может быть признан значимым при слишком малой длительности записи - 6 часов.

На рис. 3 приведены осциллограммы и спектры сигналов колебаний уровня моря, измеренных в сантиметрах на RTWS-станции и на видеотрансляции с помощью QAVIS. Сигнал QAVIS предварительно был приведен к частоте дискретизации RTWS-сигнала – 1 отсчет в минуту. Для перевода сигнала QAVIS из пикселей в сантиметры использовался масштабный коэффициент 15 см/пиксель. Он получен путем деления реальной высоты капитанской рубки парома (ориентировочно 3 м) на ее высоту в пикселях видеокadra – 20.

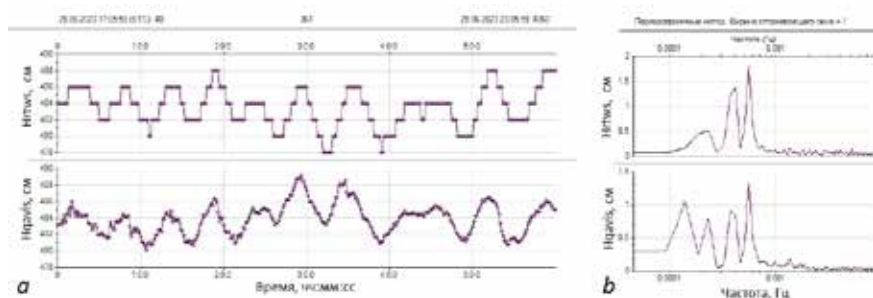


Рис. 3. Осциллограммы (а) и спектры (б) сигналов колебаний уровня моря, измеренных в сантиметрах, на RTWS-станции и на видеотрансляции с помощью QAVIS

На RTWS осциллограмме визуально заметны ложные горизонтальные ступеньки, обусловленные тем, что измеритель регистрирует колебания уровня моря с очень грубым шагом квантования 2 см. Это давняя проблема RTWS-измерителей, на большинстве иностранных GLOSS-станций точность представления уровня от 1 до нескольких миллиметров. Точность представления QAVIS-сигнала формально $150/100 = 1.5$ мм, однако с учетом шумов регистрации реальную точность мы оцениваем от 0.5 до 1 см. Отметим, что даже визуально на осциллограммах видно различное поведение низкочастотных компонент сигналов. Возможная причина, ха-

рактерная для многих научных систем видеонаблюдения, - влияние на ориентацию оптической оси камеры суточных вариаций температуры окружающей среды, воздействующих на корпус камеры либо на место ее крепления. Вместе с тем, более высокочастотные колебательные компоненты сигналов визуально более похожи. На спектрах сигналов хорошо видны синхронные по частоте пики сейшевых колебаний с периодами 30 и 35 мин, в более низкочастотной области спектры существенно различаются. Отметим также, что в RTWS спектре совсем не проявляется упоминавшаяся ранее сейшевая периодичность бухты - 12 минут, скорее всего, из-за недостаточной точности представления RTWS-сигналов. На рис. 4 демонстрируется отмеченное выше различие в поведении низкочастотных компонент сигналов и сходство сейшевых компонент. Вверху показаны с наложением осциллограммы низкочастотных компонент сигналов, внизу – высокочастотных.

В заключение, приведем кратко результаты аналогичного исследования, выполненного во Владивостоке на набережной Цесаревича. На основе анализа видеотрансляции <https://primorye.ru/webcams/zolotoy-most.html> от компании Ростелеком регистрировались вертикальные движения судна на причале под Золотым мостом. Расстояние от камеры до судна 360 м, частота дискретизации сигнала 2 Гц, размер пикселя 20 см. Применялась процедура субпиксельного трекинга с коэффициентом $q=50$. Начало измерений: 30 июня 2023 г., 22:53 (UTC), длительность около 18 часов. На рис.5 сверху вниз показаны отдельно осциллограммы сигналов RTWS и QAVIS, а также осциллограммы их сейшевых компонент с наложением (RTWS черные, QAVIS синие). QAVIS приведен к частоте 1 отсчет в минуту.

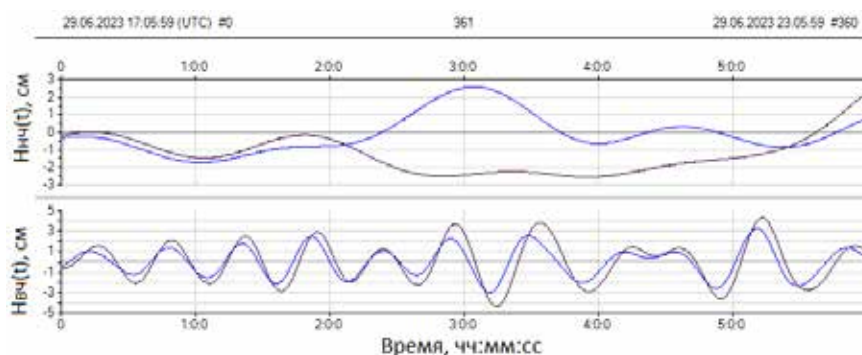


Рис. 4. Осциллограммы низкочастотных (вверху) и высокочастотных (внизу) компонент сигналов RTWS (черные графики) и QAVIS (синие графики)

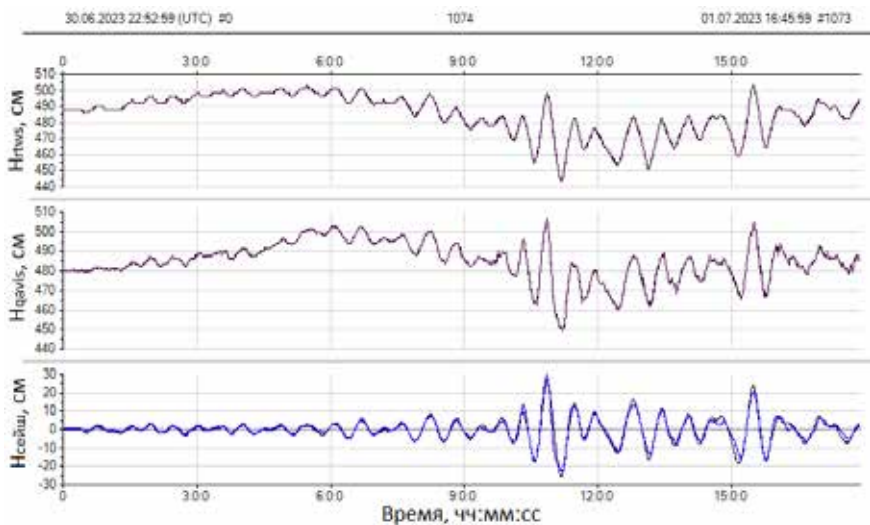


Рис. 5. Измерения на Набережной Цесаревича: осциллограммы сигналов RTWS и QAVIS

В данном случае очень похожи и сами сигналы и особенно их сейшевые компоненты. Важная особенность - аномально большой размах сейшевых колебаний, более 50 см. В целом полагаем, что реализация процедуры субпиксельного трекинга в программе QAVIS существенно увеличила ее возможности для измерения колебаний уровня моря на основе анализа в режиме реального времени видеотрансляций с прибрежных IP-камер.

Литература

1. Fischenko V.K., Goncharova A.A., Dolgikh G.I., Zimin P.S., Subote A.E., Golik A.V. Express image and video analysis technology QAVIS: application in system for video monitoring of Peter the Great Bay (Sea of Japan / East Sea) // J. Mar. Sci. Eng. 2021. 9(10). 1073; <https://doi.org/10.3390/jmse9101073>.