

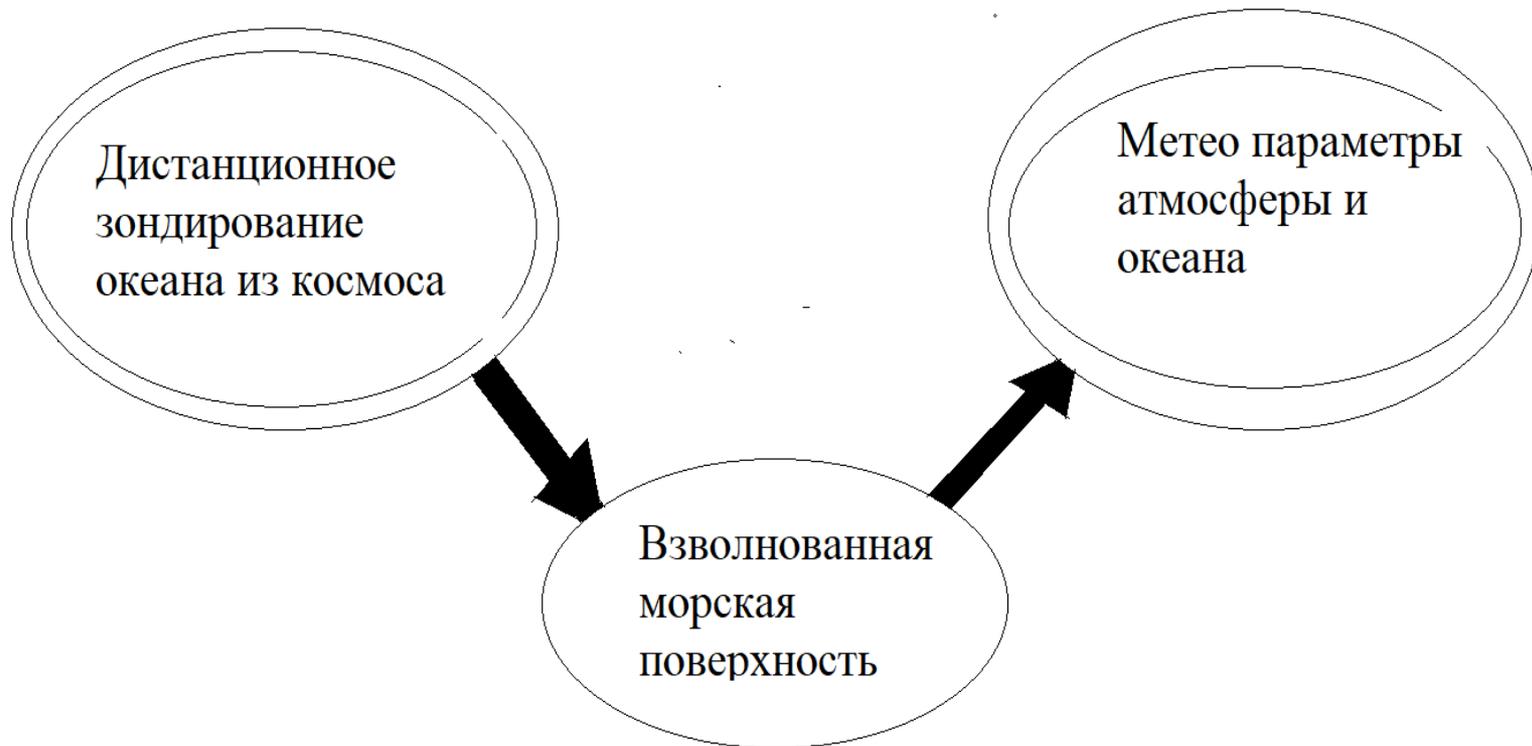
Сканирующий лазерный волнограф с регистрацией «МГНОВЕННЫХ» профилей морской поверхности

Стерлядкин В.В.¹., Куликовский К.В.¹., Кузьмин А.В.²., Ростовцева Е.И.

¹МИРЭА-Российский технологический университет, РТУ МИРЭА

²Институт космических исследований ИКИ РАН

Обычно спутниковые данные напрямую связывают с метеопараметрами. Но физика процессов переноса электромагнитного излучения требует исследования посредника –морского волнения. Сейчас этого не хватает.



До последнего времени не существовало точных методов оперативного и всепогодного измерения волнения на большом интервале масштабов: от миллиметров до метров. Эти данные нужны океанологам для построения моделей развития волнения, для дистанционных методов зондирования Земли из космоса.

Аннотация

1. Описан прямой оптический метод измерения длинных (от 20000) рядов «мгновенных» профилей морской поверхности с точностью 0.5 мм и пространственным разрешением 1 мм и частотой обновления до 60 Гц.
2. Измерения профиля поверхности могут проводиться на пространственных масштабах от единиц миллиметров до единиц метров при времени усреднения 10^{-4} с.
3. Приведены результаты натурных измерений параметров морского волнения: спектров амплитуд, распределение уклонов при различных пространственных масштабах усреднения.
4. Метод полностью дистанционен, не искажает свойства поверхности, не подвержен влиянию ветра, волн и морского течения, позволяет измерять долю пены на поверхности. Экспериментально доказана возможность применения предложенного метода в любое время суток и в широком диапазоне погодных условий.

Известные методы измерения ветрового волнения

- **Струнные волнографы**, в которых используется изменение сопротивления струн при изменении уровня погружения струн в воду. Недостатками таких волнографов является неконтролируемое изменение сопротивления при охлаждении струны ветровыми пульсациями, нарастание водорослей, взаимное электрическое влияние соседних струн друг на друга.

- **Фотографии солнечных бликов.**

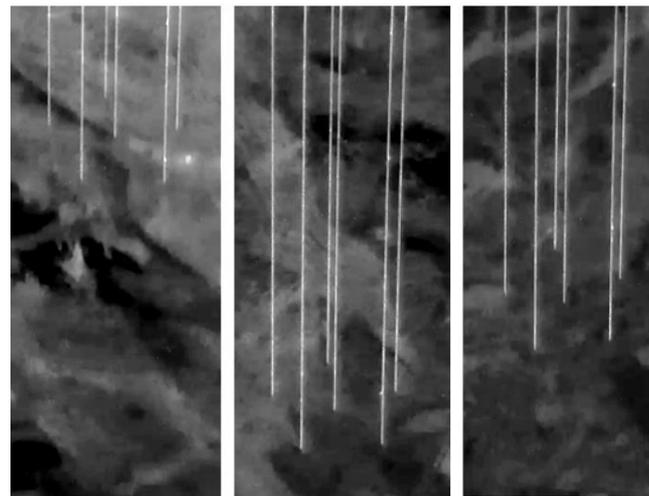
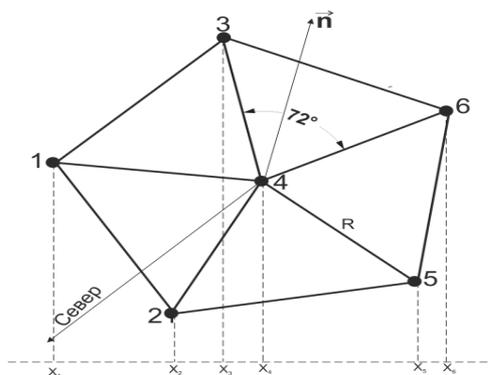
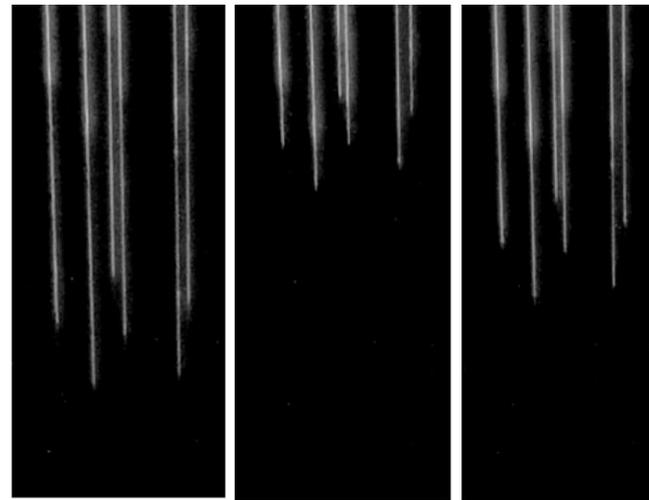
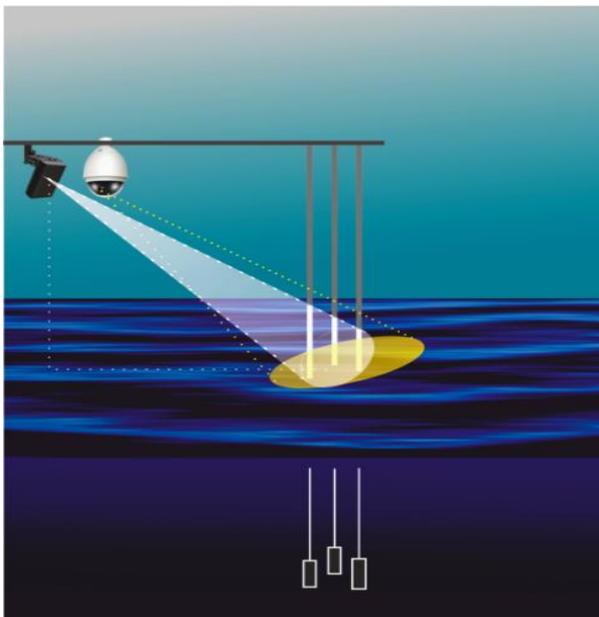
Нужно солнце. Не является прямым методом, зависят от облачной засветки.

- **Лазерное сканирование с самолета** (Hwang et al. 2000).

Лазерные альтиметры (Grare 2018). Не регистрируют профиль волнения.

- **Регистрация преломленного лазерного луча**, выходящего из воды. Недостаток - наличие громоздкой приемной оптической системы, которую необходимо фиксировать на расстоянии 30-60 см над поверхностью.
- **Ножевой лазерный луч**, рассеянный поверхностью. Регистрация на фото или видео камеру. Недостаток - размывание границы раздела.

Струнный волнограф с ИК регистрацией длины струн



• Патент на изобретение 2711585 РФ // Оpubл. 17.01.2020. Бюл. № 2.

Описание методики и принципов измерений «мгновенной» формы морской поверхности



- *Видеокадр лазерного луча рассеянного на морской поверхности в ночное время. Верхний край луча соответствует границе раздела воздух-вода.*

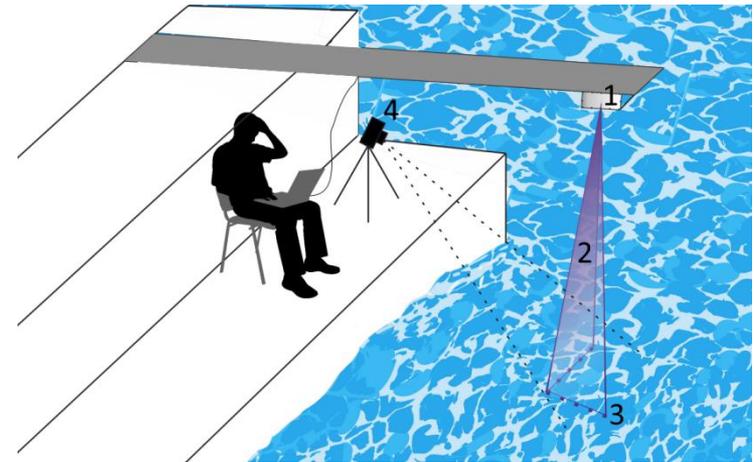
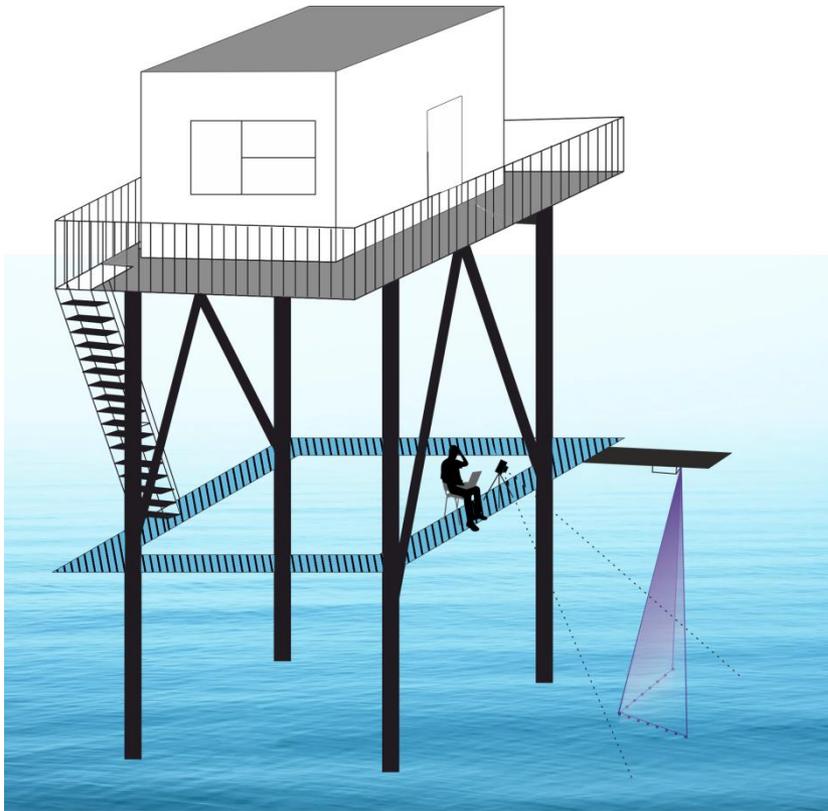
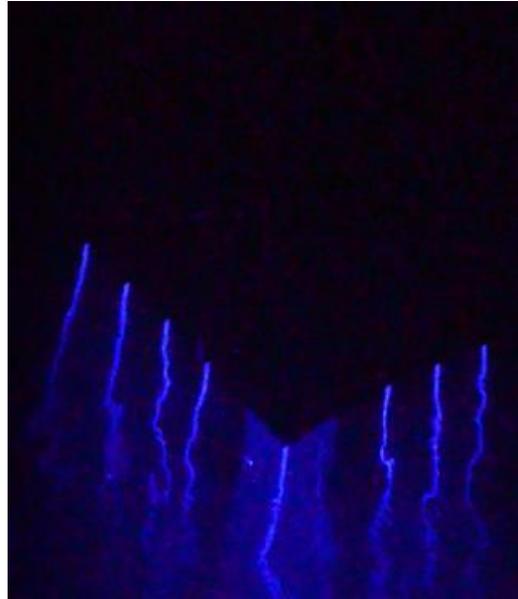


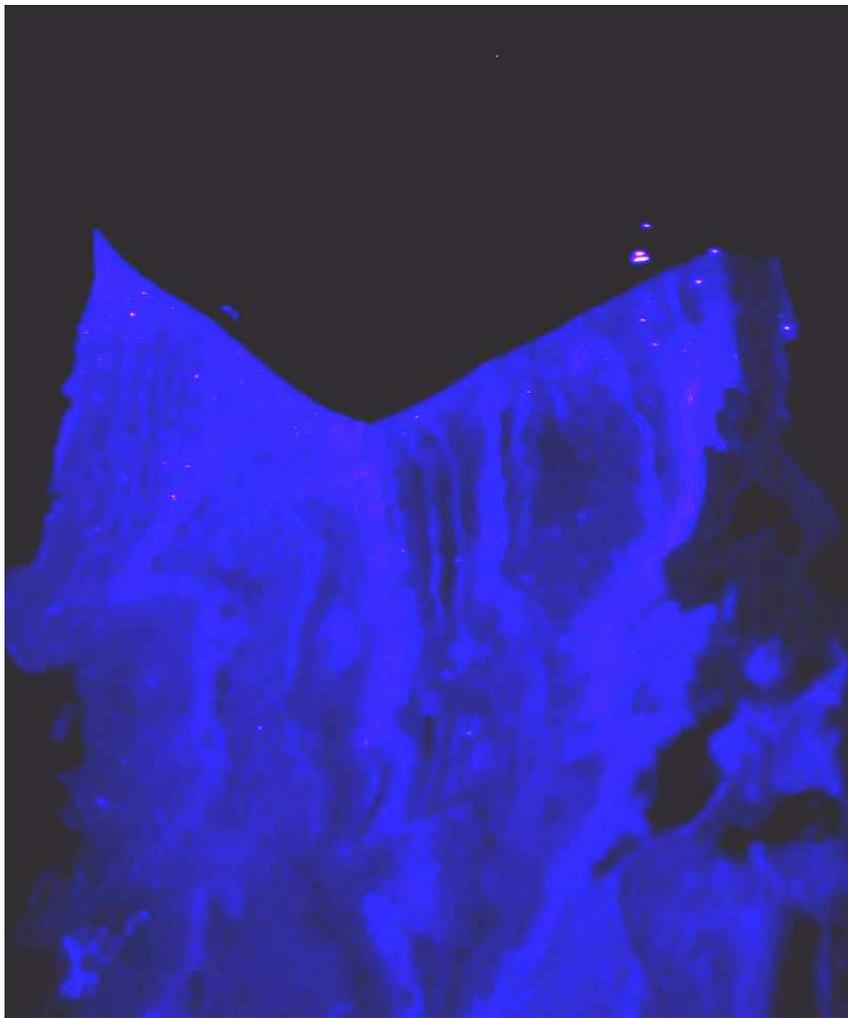
Схема измерений волнения на океанографической платформе и на пирсе. Сканатор направляет игольчатый лазерный луч по заданной траектории. Рассеянное поверхностью излучение регистрируется на цифровую видеокамеру.

Принцип измерения «мгновенный» профилей волнения



Сканатор разворачивает узкий луч лазера вдоль некоторой траектории по известному пространственно временному закону с частотой повторения, синхронизированной с цифровой видеокамерой. Синхронизация дает время задержки каждой точки по отношению к началу развертки. По анализу последовательности кадров для каждой точки траектории определяют скорость ее вертикального перемещения на данном кадре. Затем вводится поправка аппликата поверхности, которая учитывает смещение каждой точки траектории по вертикали за время задержки.

Видео



Точностные характеристики метода

- В результате на каждом кадре получаем профиль волнения, приведенный к единому моменту времени, например, к началу развертки. Если время развертки, (равное времени выдержки) составляет $\tau=30$ мс, а число разрешаемых точек на траектории развертки $N=300$, то время экспозиции каждой точки поверхности будет иметь масштаб 10^{-4} с.
- Точность синхронизации по времени для всех точек кадра будет иметь такой же масштаб 10^{-4} с.
- За это время даже при скорости вертикального смещения волновой поверхности $V=1$ м/с освещаемая точка успеет сместиться всего на 0.1 мм, засветив не более 1 пиксела на видеоматрице.
- Горизонтальное разрешение при измерении профиля поверхности составляет 1-3мм и определяется размерами лазерного луча на волновой поверхности и разрешением видеокамеры.

Возрастает отношение сигнал шум

- В предлагаемом методе лазер сканирует по поверхности, а в известном методе лазерный луч имеет ножевой вид.
- В предлагаемом методе со сканированием эта энергия будет освещать не более 0,1 мм (один пиксел по высоте).
- В случае с ножевым лучом волновая поверхность за время экспозиции $\tau=30$ мс будет размыта по высоте на $\Delta Z=V*\tau$, где $V=0,5$ м/с - скорость вертикального перемещения поверхности, то есть на 15 мм, поэтому энергия, падающая на поверхность, будет размыта по вертикали не на один, а на десятки пикселей.
- Отношение сигнал шум в предложенном методе возрастает в десятки раз.

3. Описание аппаратуры и алгоритма получения «мгновенного» профиля морского волнения

- Проверка метода проводилась в натуральных условиях с края морского пирса, выдвинутого в море на 60 метров.

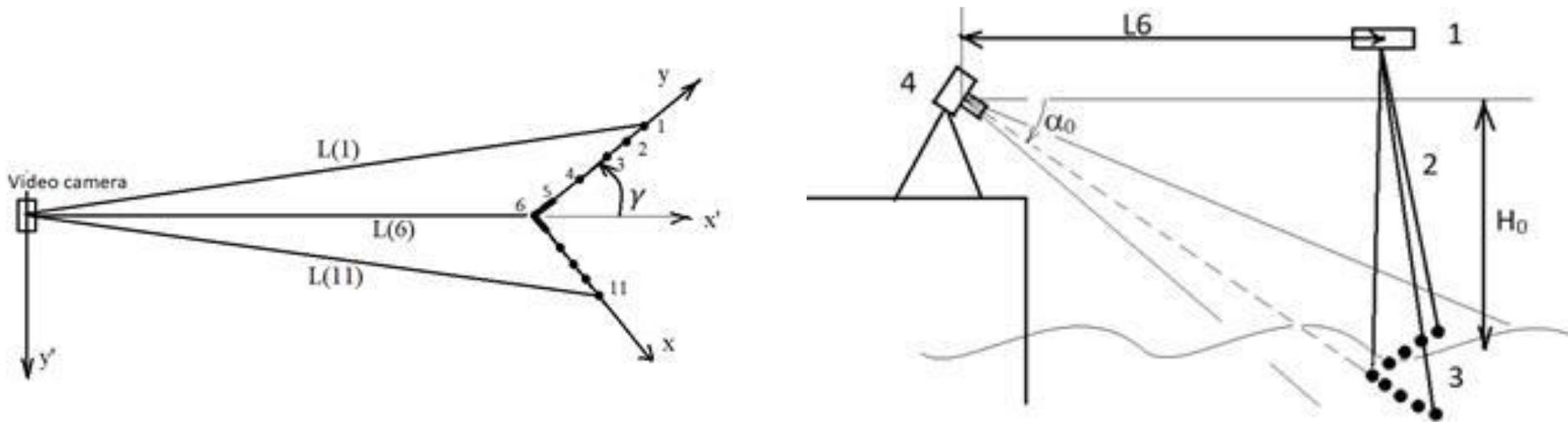
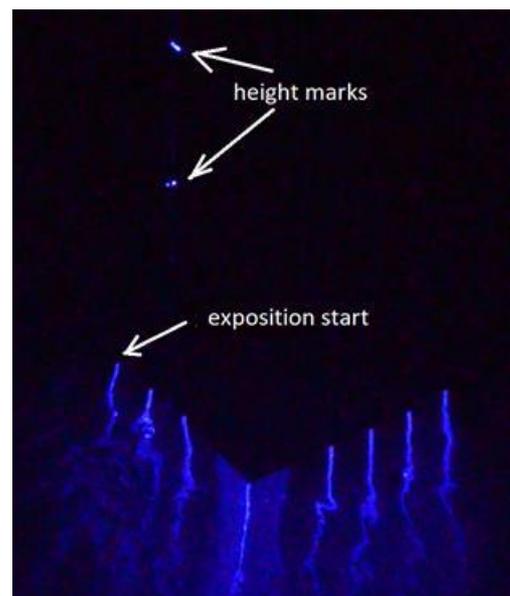
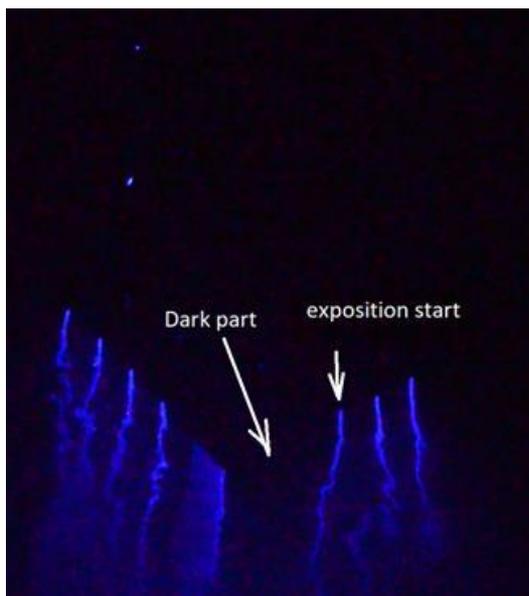


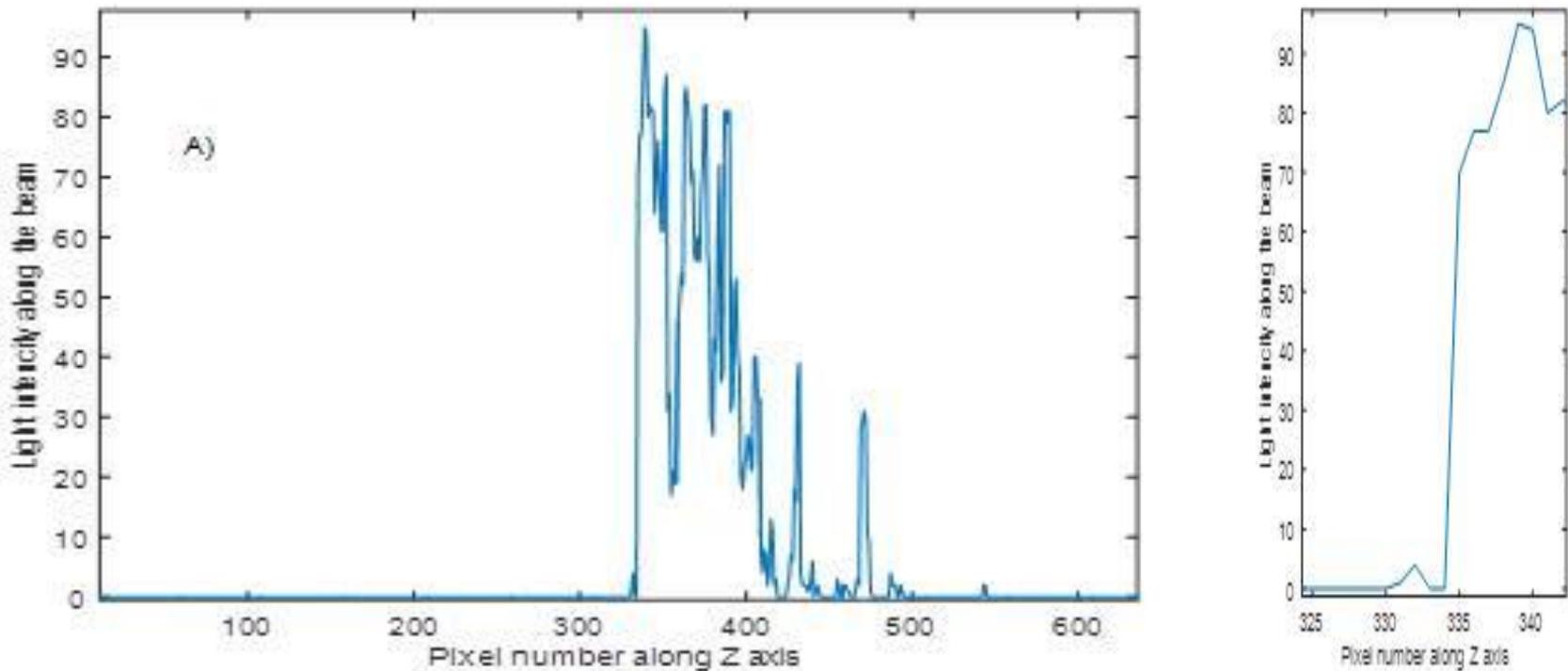
Рис.4. а) Вид сверху на морскую поверхность и расположение видеокамеры. б) вид сбоку.

- Использовалась видео камера Nikon D7000, лазер ($\lambda=445$ нм) с непрерывной мощностью $P=2.5$ Вт, сканирующее устройство управлялось блоком питания, программируемым от ноутбука. В данной работе описана первая версия волнографа, в которой не было возможности синхронизовать видео камеру со сканатором.



Время экспозиции) составляло $\tau_{\text{exp}}=30$ мс, а период развертки был выбран 36 мс. Поэтому на каждом кадре лазерный луч освещал не все точки траектории, а 83% от всей развертки, формируя на кадре темную область в том или ином месте траектории. Это позволило провести поправку на смещение и привести все высоты к единому моменту времени - началу записи на видеоматрицу.

Методика определения аппликат волновой поверхности во всех точках траектории

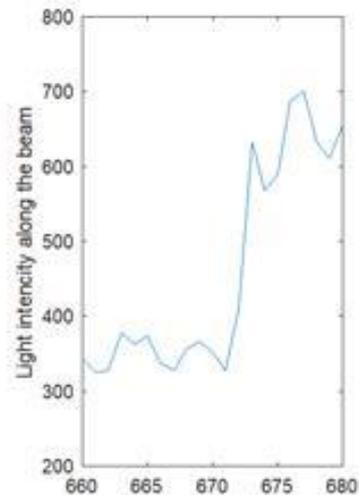
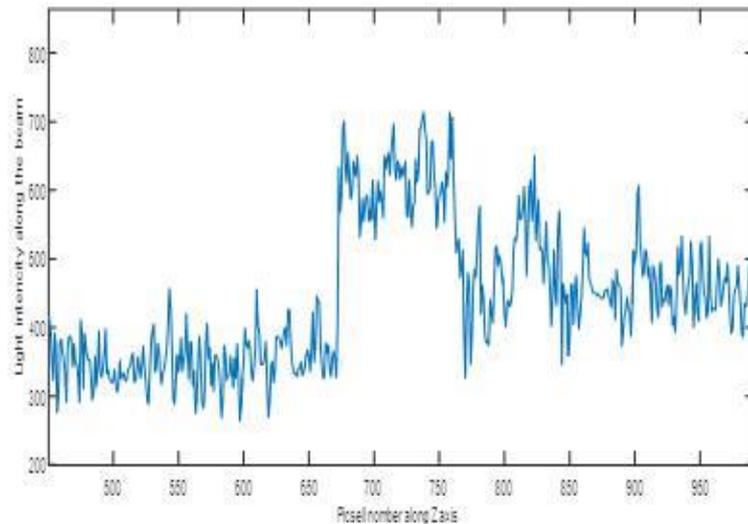


Зависимость интенсивности засветки видео кадра вдоль одного луча при ночных измерениях. Четко регистрируется начало засветки, которое соответствует поверхности раздела.

Дневные измерения 12:37 мск



Применялся поляризатор, который позволял существенно уменьшать вклад фонового излучения неба. Использовались два сканатора, которые можно разнести на любое расстояние и калибровочная нить.



Днем также удается регистрировать границу раздела. Для увеличения отношения сигнал/шум лазерный луч за время экспозиции останавливался в выделенных точках траектории.

1. Вычислялось положение (в пикселах) невозмущенного уровня водной поверхности для i -го луча как среднее значение по большому числу кадров:

$$Z_{\text{cp}}(i) = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{k=1}^N Z(k, i) \quad (1)$$

2. Для используемой видео матрицы в рабочей области угол наблюдения (k, i) был линейно связан с номером пиксела $Z(k, i)$:

$$(k, i) = \alpha_0(i) + A \cdot [Z(k, i) - Z_{\text{cp}}(i)] \quad (2)$$

Здесь коэффициент A имеет размерность рад/пиксел и вычисляется по калибровочным меткам высоты на вертикально расположенной нити, рис.5, либо по известному расстоянию между точками $i=1$ и $i=11$.

3. Горизонтальное расстояние $L(i)$ от видео камеры до i -го луча на невозмущенной водной поверхности рассчитывалось по очевидным формулам, рис.4:

$$L(i) = \sqrt{(x'(i))^2 + (y'(i))^2} \quad (3)$$

Здесь $x'(i) = L(6) + x(i) \cdot \text{Sin}(\gamma) + y(i) \cdot \text{Cos}(\gamma)$; $y'(i) = x(i) \cdot \text{Cos}(\gamma) - y(i) \cdot \text{Sin}(\gamma)$, а угол γ разворота сканатора относительно оси x' вычислялся по положению $i=1$ луча и $i=11$ луча на видео кадре.

4. Высота границы раздела $\xi(k, i)$ для i -го луча в миллиметрах над уровнем невозмущенной поверхности вычислялась с учетом геометрии расположения каждого луча:

$$(k, i) = H_0 - H(k, i) = L(i) \cdot [\text{tg}((k, i)) - \text{tg}(\alpha_0(i))]$$

5. Для каждого i – i -го луча (точки траектории) рассчитывается скорость вертикального смещения волны по формуле:

$$v(k, i) = (\xi(k, i) - \xi(k - 1, i)) / \tau_{\text{повт}}, \quad (5)$$

где $\tau_{\text{повт}}$ – период повторения кадров

6. По известному пространственно временному закону сканирования определяется время задержки $t_{\text{зад}}(k, i)$ прихода луча в i – тую точку по сравнению с началом сканирования.

7. «Мгновенный» профиль высоты поверхности вдоль траектории сканирования, приведенный к началу сканирования i -го кадра вычисляется по формуле

$$\xi_{\text{мгн}}(k, i) = \xi(k, i) - v(k, i) \cdot t_{\text{зад}}(k, i) \quad (6)$$

Погрешности метода

- При сканировании по заданной траектории длиной L пространственное разрешение вдоль траектории луча ΔL определяется тремя факторами: степенью фокусировки лазерного луча вдоль траектории, разрешением матрицы видео камеры по вертикали ΔR (геометрический размер изображения на одном пикселе видео матрицы), а также смещением ΔZ волновой поверхности по вертикали за время освещения данного элемента поверхности.
- Ширина лазерного луча сфокусированного вблизи поверхности в эксперименте составляла $\Delta l=1-2$ мм, размер пиксела имел масштаб $\Delta R=1-1.5$ мм, а размытие волновой поверхности ΔZ за время освещения при равномерном сканировании, как правило, было значительно меньше 1мм,

$$\Delta \xi = [(\Delta l \cdot ctg(\theta))^2 + \Delta R^2]^{0.5} = 1.25 - 2.3 \text{мм},$$

- С учетом поправки на скорость вертикального движения, точность регистрации профиля высот на поверхности раздела в предложенной методике имеет масштаб близкий к 1мм.

Результаты натуральных измерений

Измерения проводились 10-11 октября 2020 с пирса Морского гидрофизического института РАН п. Кацивели.

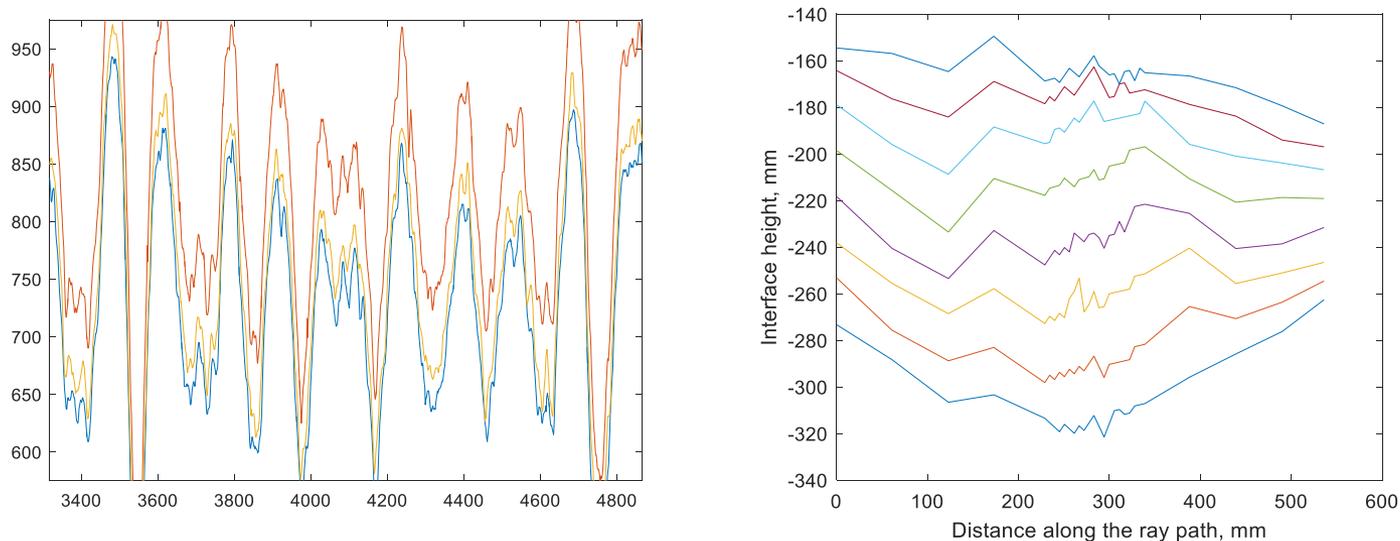


Рис. 7. а) Зависимость номера пиксела, находящегося на границе водной поверхности, для трех лучей 1, 6 и 11 от номера кадра в видеозаписи, б) «Мгновенные» профили высоты волновой поверхности в зависимости от расстояния вдоль траектории сканирования для 8 последовательных кадров. На краях траектории шаг измерений 55 мм, а в центре шаг составляет 5,5 мм.

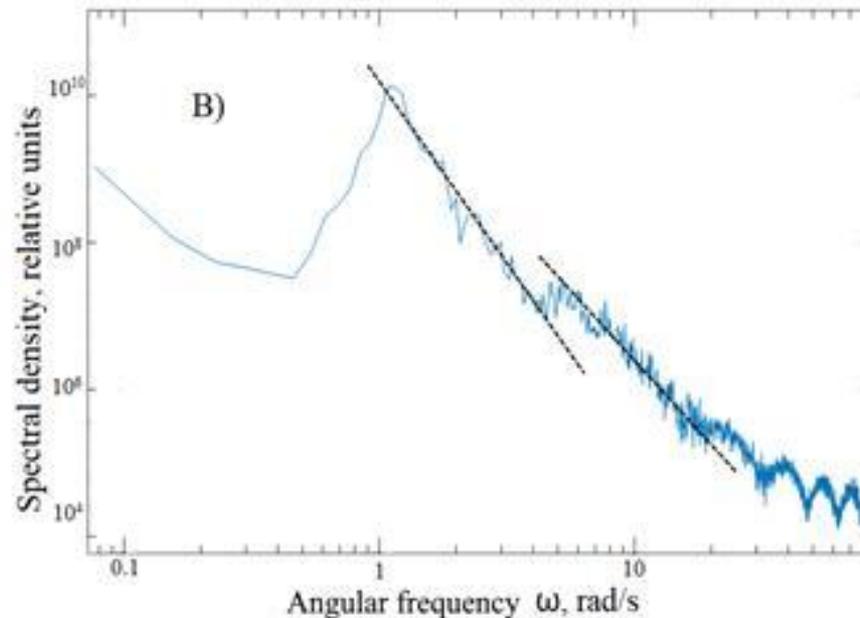
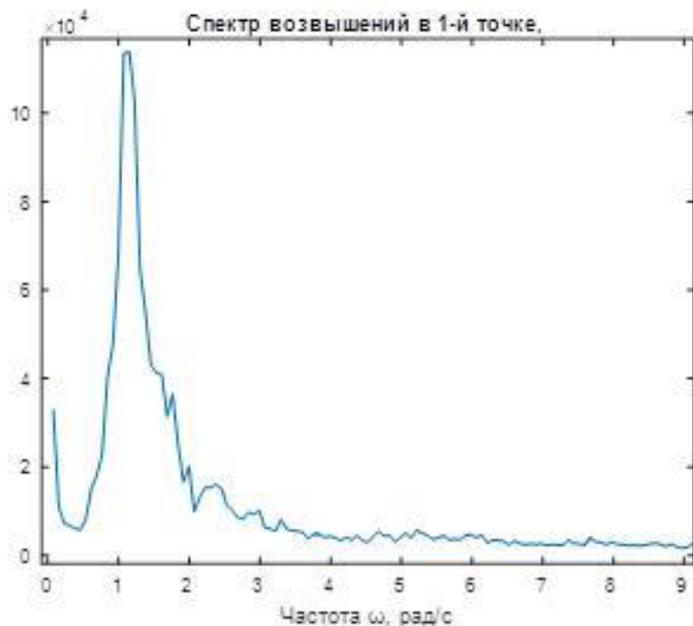


Рис.8. Спектры возвышений для одного луча: а) в линейном масштабе, б) в логарифмическом масштабе.

Из графика следует, что на участке частот $1 < \omega < 4$ рад/с степенная зависимость имеет показатель -5.0 ± 0.2 , а на участке частот $5 < \omega < 20$ рад/с наклон спектра составляет -4.0 ± 0.2 . Соответствующая степенная аппроксимация показана на графиках пунктирными отрезками. Следует отметить, что показатель степени -5 соответствует известной модели спектра Филлипса (Phillips, 1958), а показатель -4 согласуется с моделью Захарова (Badulin Zakharov, 2020).

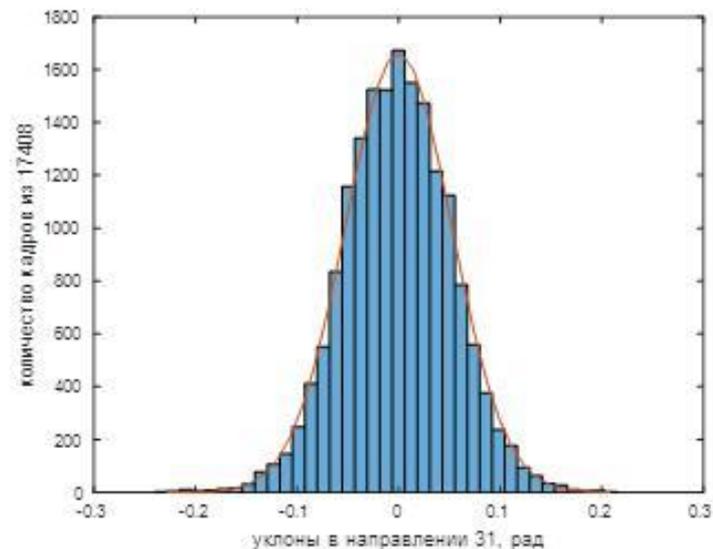
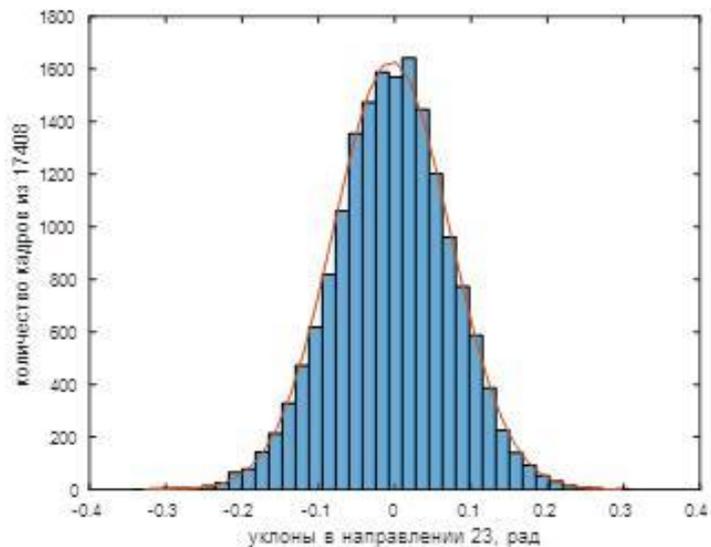
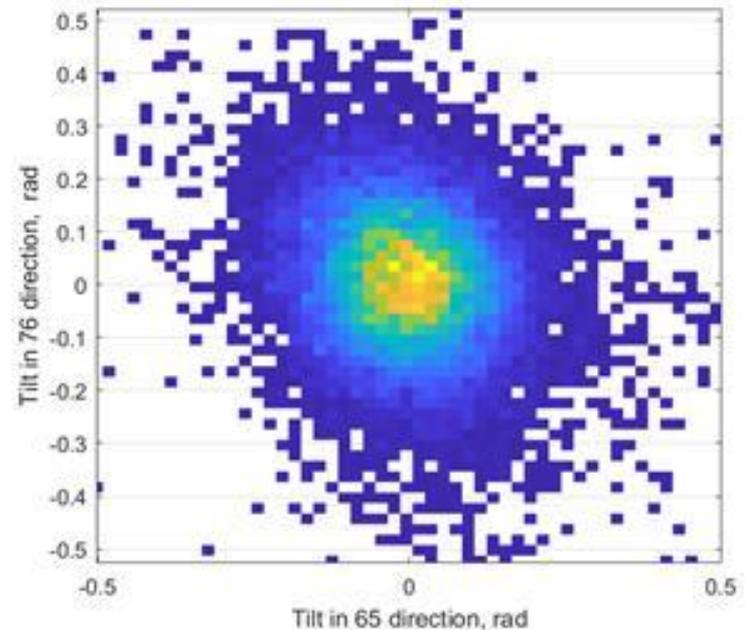
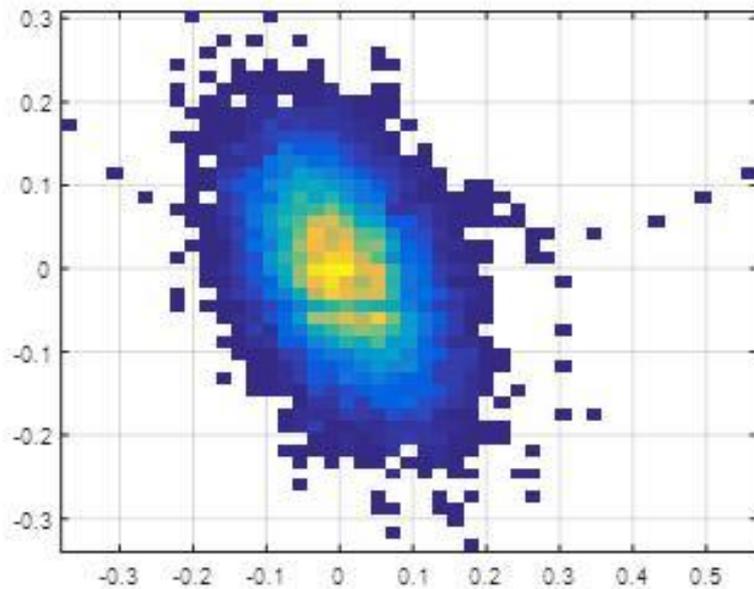


Рис.9. Распределение уклонов между парами точек: а) уклоны между точками 1 и 6, (расстояние 283 мм) б) уклоны между точками 11 и 1, (расстояние 253мм).

Так, уклоны между точками 1 и 6, (рис.9а) имеют дисперсию $\sigma_{1,6} = 0.0763$, а дисперсия уклонов между точками 11 и 1 (рис.9б), составляет $\sigma_{11,1} = 0.0524$. Различие дисперсии уклонов обусловлено различием направлений измерений по отношению к направлению основных ветровых волн. Это согласуется с результатами измерений Кокса-Манка.

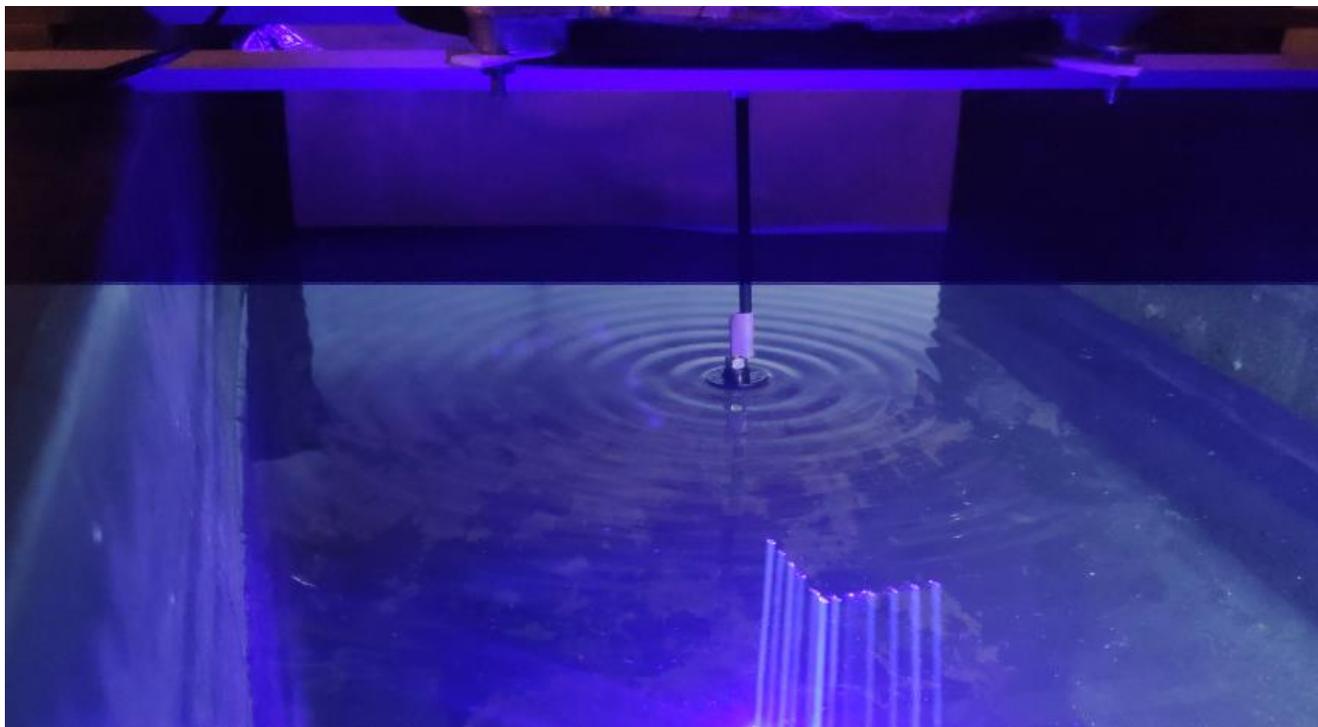


*Рис.10. Двумерное распределение уклонов на треугольниках различного масштаба: а) стороны прямоугольника 283*253мм, б) прямоугольник 54*56 мм*

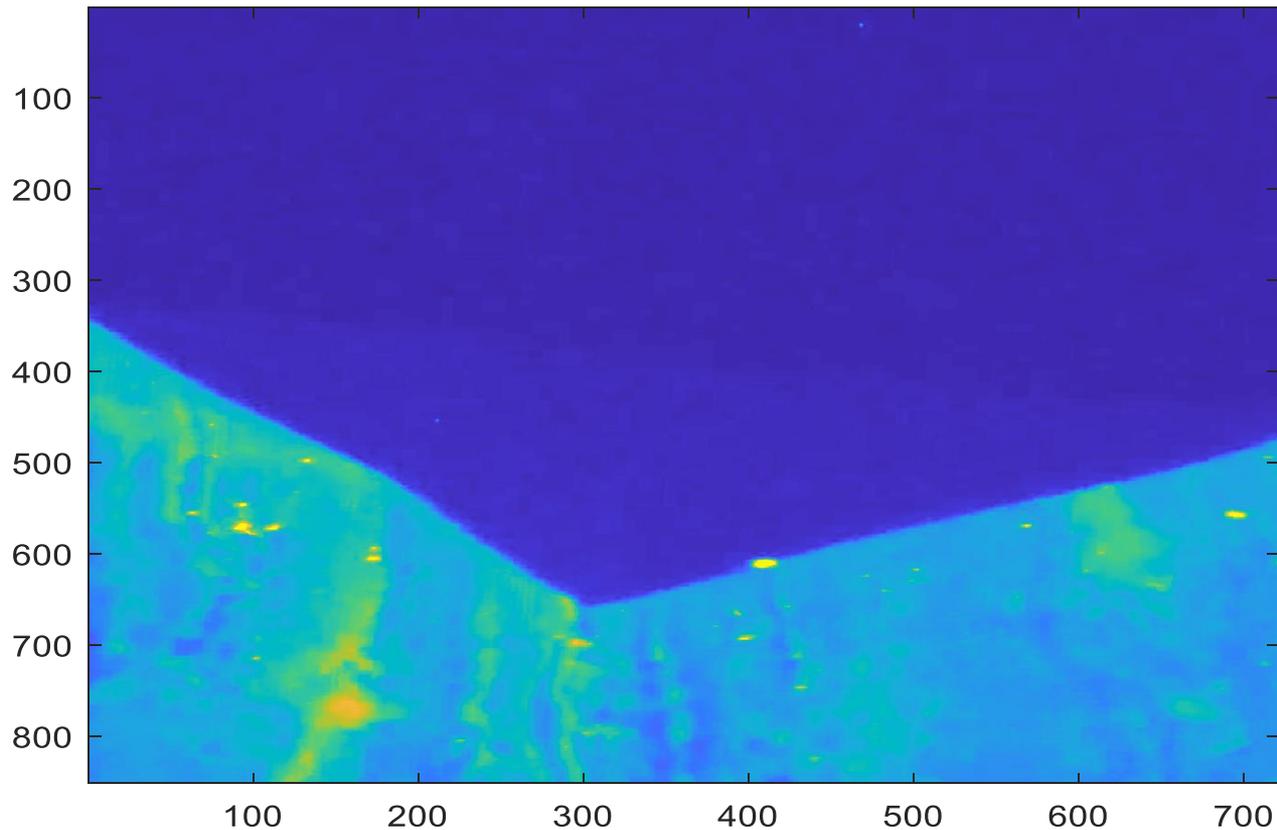
Из приведенных распределений видны известные закономерности уменьшения анизотропии и увеличения дисперсии с уменьшением масштаба выбранных треугольников на морской поверхности.

Перспективы метода. Возможность регистрации капиллярных волн

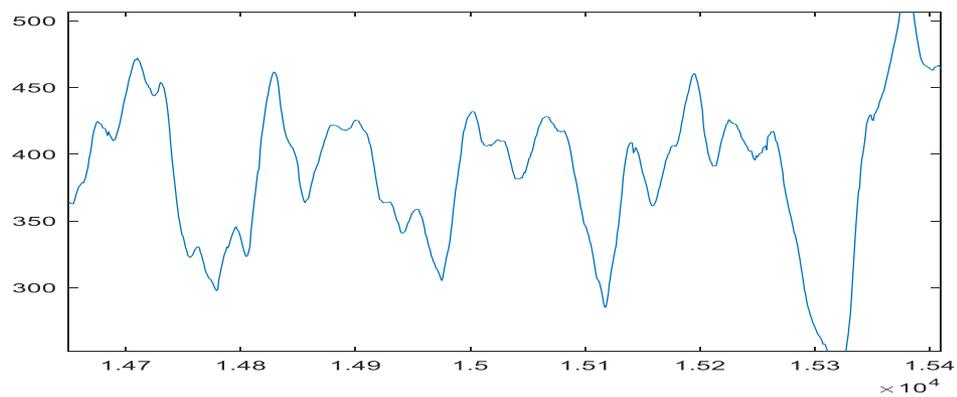
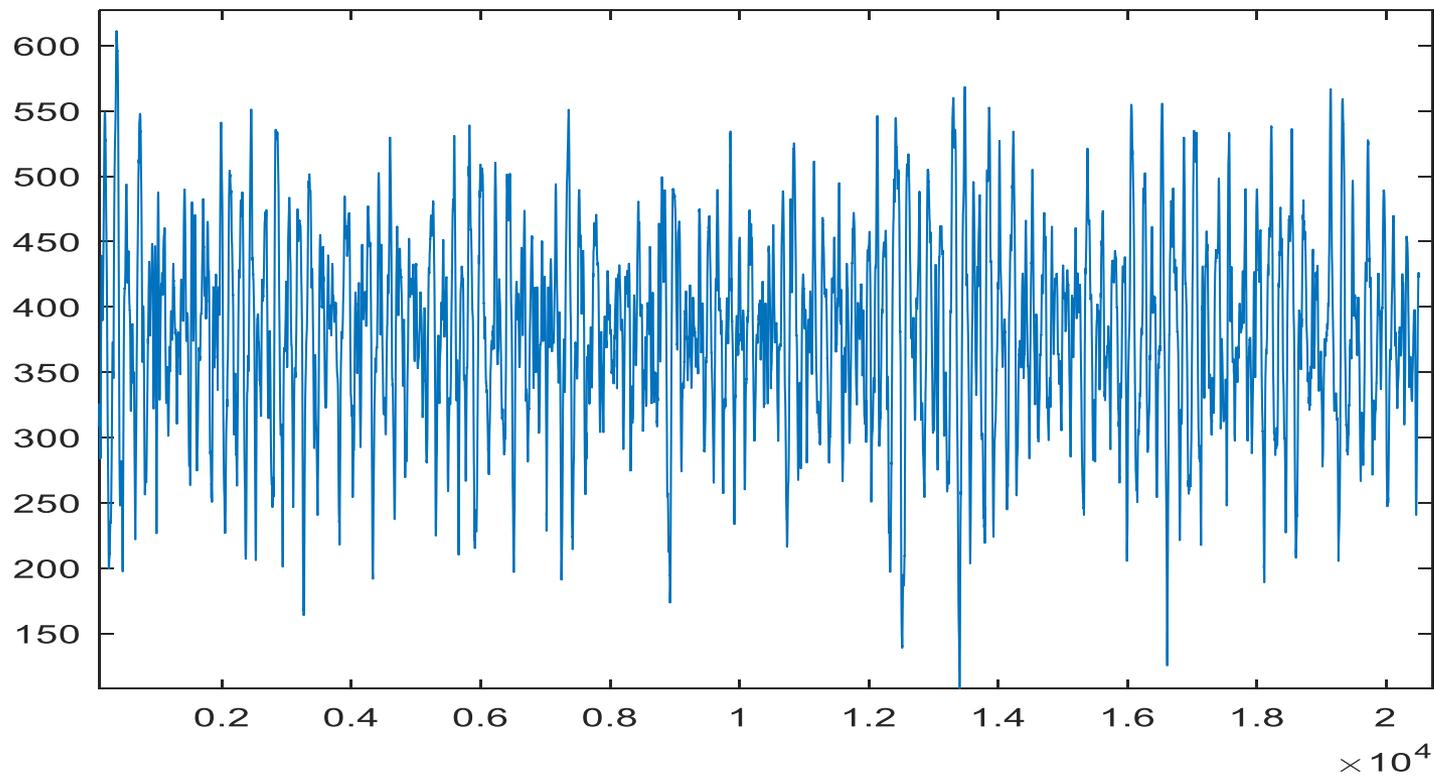
Капиллярные волны имеют частоты выше 16 Гц и амплитуду на уровне 1 мм. Для регистрации капиллярной составляющей необходимо увеличить частоту видеосъёмки, до 60-100 Гц, а также использовать длиннофокусную оптику, которая обеспечит разрешение матрицы на уровне 0.1 мм. На рисунке – исследование капиллярных волн в лабораторных условиях



Измерение капиллярных волн на морской платформе, пгт. Кацивели 2021

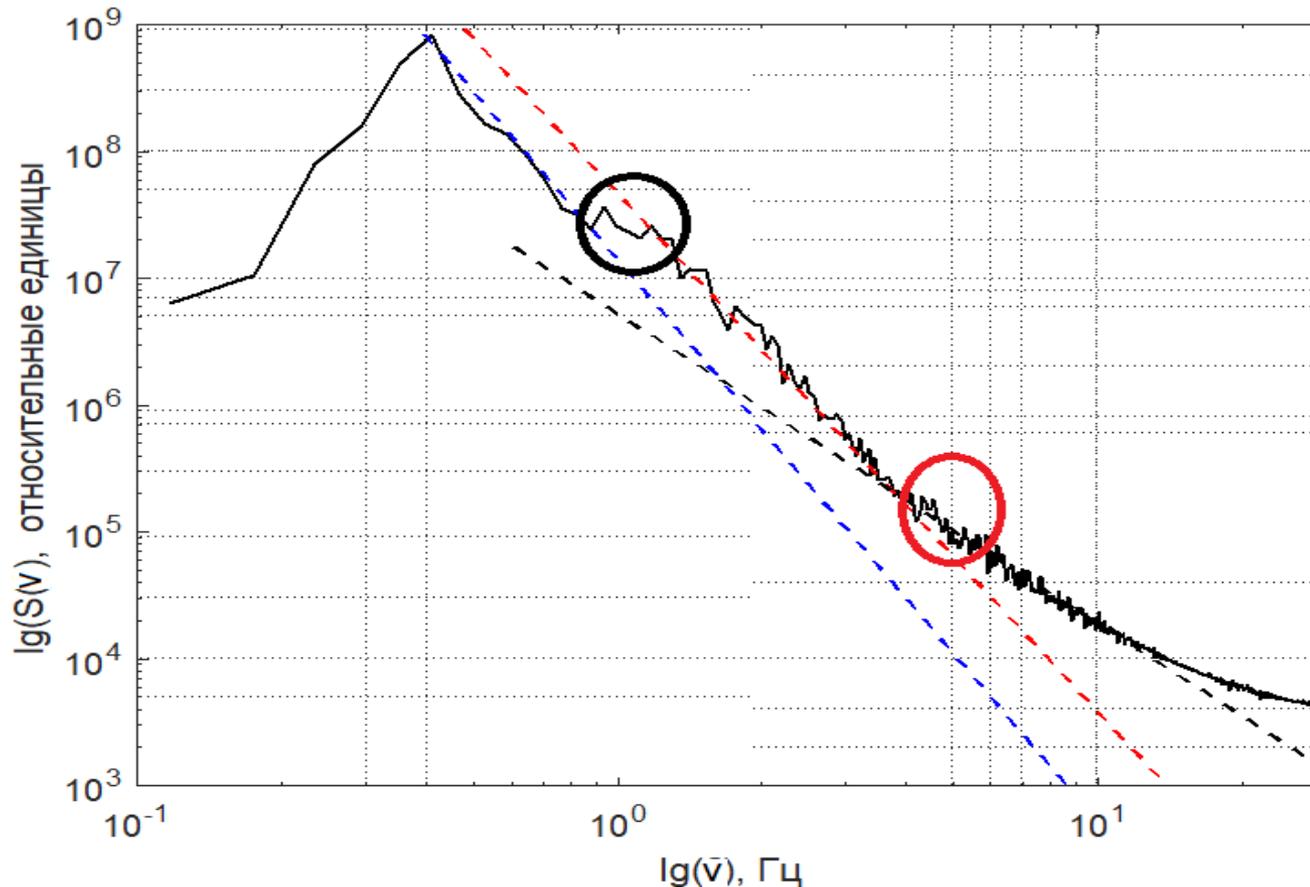


Измерения волнения 26 августа 2021 20:47 мск на платформе. Частота оцифровки-60 Гц. Возможны измерения как временных, так и пространственных спектров. Ряды данных для одной реализации состоят из 21 600 «мгновенных» спектров.



Зависимость положения границы раздела для одной точки траектории.
Длина выборки - 21600 точек

Спектр возвышений



Спектр возвышений в отдельной точке профиля в логарифмическом масштабе для развивающегося волнения 26.08.2021. Кацивели.
Показатели степени на первом, втором и третьем (капиллярном) участках составляют: $4,5 \pm 0,3$; $4,0 \pm 0,2$; $2,6 \pm 0,2$.

Заключение

- Предложен практически всепогодный волнограф, позволяющий проводить измерение «мгновенной» формы морской поверхности по любой выбранной траектории с частотой видео съемки.
- Достижимая точность измерения аппликат волновой поверхности на уровне 0,5 мм и выше, с возможностью регистрации всех типов волн: от гравитационных до капиллярных.
- Метод полностью дистанционный, не подвержен влиянию волн, ветра или течения.
- Нет ограничений на бальность измеряемого волнения, возможна регистрация участков с обрушением. Появление пены на поверхности легко регистрируется автоматически по резкому усилению уровня рассеянного излучения.
- Способ запатентован. Стерлядкин В.В. Сканирующий оптический волнограф. Патент РФ №2746186, от 20.12.2019

Публикация результатов

- Струнный волнограф с инфракрасной регистрацией длины струн. **Патент РФ №2711585**, от 17.01.2020
- Сканирующий оптический волнограф. **Патент РФ №2746186**, от 20.12.2019
- V. V. Sterlyadkin, K. V. Kulikovskiy, A. V. Kuzmin, E. A. Sharkov, and M. V. Likhacheva. Scanning Laser Wave Recorder with Registration of “Instantaneous” Sea Surface Profiles // **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, 2021. pp.1415–1424

Спасибо за внимание