

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАВИТАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН ПО ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ

О.Г. Константинов

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: (423-2) 31-14-00
e-mail olegkon@poi.dvo.ru*

В ТОИ ДВО РАН разработан аппаратно – программный комплекс для натурных измерений характеристик морского волнения, основанный на регистрации и анализе поляризационных видео изображений морской поверхности. Комплекс состоит из поляризационной камеры, системы поплавков и программно реализованной методики определения уклонов и высот элементов поверхности по характеристикам их поляризационных изображений. Цель создания комплекса – получение информации о пространственно-временных характеристиках уклонов элементов морской поверхности. Предложена система поплавков, расположенных в поле зрения поляризационной камеры. Эта система позволяет сравнивать результаты поляризационных измерений с реальными высотами и уклонами элементов поверхности. Она предназначена для оценки метрологических характеристик поляризационной камеры и метода поляризационной съемки и необходима для дальнейшего их совершенствования. Рассмотрены основные соотношения для поляризационных характеристик отраженного света и соотношения, необходимые для определения ориентации отражающих элементов морской поверхности. Рассмотрена возможность использования комплекса для исследования гравитационно-капиллярных волн. Приведены условия проведения измерений, основные характеристики аппаратуры, сравнение результатов натурных поляризационных измерений с высотами и уклонами поверхности моря, рассмотрены возможные пути совершенствования.

Введение

Состояние морской поверхности является важным источником информации для средств дистанционного зондирования океана. Натурные измерения пространственно-временных характеристик волнения в широком диапазоне частот и волновых чисел важны для исследования их взаимосвязи с динамическими процессами, протекающими в атмосфере и в верхнем слое океана. Существующие средства и методы измерений геометрических характеристик не всегда обеспечивают требования исследователей, как в плане набора регистрируемых параметров, так и в плане точности, достоверности полученных результатов и трудоемкости подготовки и проведения измерений. Целью этой работы было создание оптического измерительного комплекса, который может обеспечить измерение параметров поверхностного волнения в натуральных условиях с достаточной точностью. Кроме этого, комплекс должен обладать возможностью самокалибровки. Необходимость в этом обусловлена тем, что в настоящее время нет специализированной аппаратуры для анализа параметров поверхностного волнения. Основная задача комплекса – измерение временных изменений пространственной ориентации и высот элементов морской поверхности, находящейся в поле зрения измерительного комплекса.

1. Основные соотношения

Во всех дальнейших рассуждениях предполагается, что от морской поверхности зеркально отражается неполяризованный свет небосвода, а в поле зрения отсутствует солнечный блик. Это требование хорошо выполняется в условиях сплошной облачности. На рис. 1. приведена схема проведения поляризационных измерений. Свет неба падает на отражающую площадку S по направлению DO ; площадка S наблюдается под углом визирования α по направлению YaO ; β - угол между плоскостью отражения $DOYa$ и вертикальной плоскостью YOZ , ϕ – угол отражения.

При отражении света от поверхности воды свет, поляризованный в плоскости отражения и перпендикулярно плоскости отражения, отражается по-разному. Энергетические коэффициенты отражения в зависимости от угла отражения ϕ и угла преломления ψ описывается формулами Френеля [1]:

$$R_S = \sin^2(\phi - \psi) / \sin^2(\phi + \psi); \quad (1)$$

$$R_P = \text{tg}^2(\phi - \psi) / \text{tg}^2(\phi + \psi);$$

где $\sin(\psi) = \sin(\phi) / n$;

R_S - коэффициент отражения компоненты, электрический вектор которой

перпендикулярен к плоскости отражения;
 R_P - компонента, электрический вектор которой лежит в плоскости отражения;
 n - показатель преломления морской воды относительно воздуха. На рис. 2 приведены значения энергетических коэффициентов отражения R_S и R_P , их разности $R_S - R_P$ и их отношения $R_{SP} = R_S/R_P$ в зависимости от угла отражения ϕ .

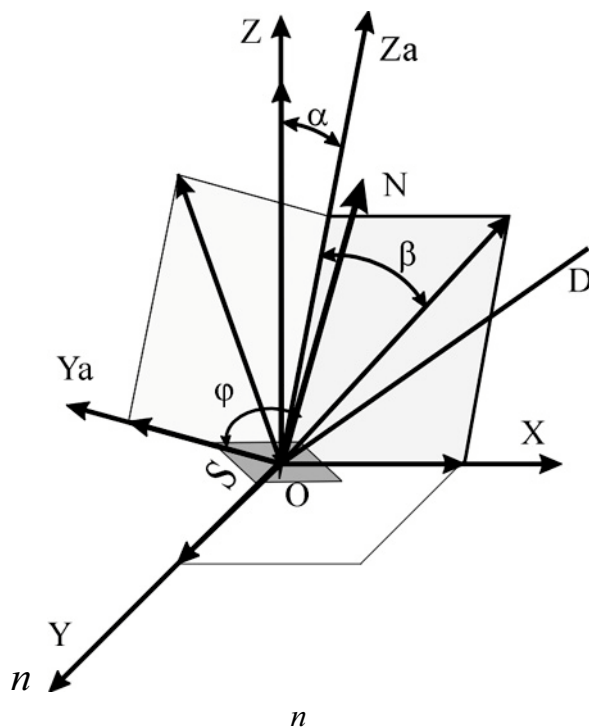


Рис. 1. Геометрия отражения света элементом морской поверхности.

Отраженный свет частично линейно поляризован. Яркость элемента поверхности является суммой полностью поляризованной компоненты E и неполяризованной компоненты D .

$$E = B_H(R_S - R_P) \quad D = 2 B_H R_P + B_{MD} \quad (2)$$

где B_H - яркость участка небосвода, отраженного элементом поверхности;

B_{MD} - яркость компоненты восходящего излучения, диффузно рассеянного в толще воды в направлении визирования. Интенсивность линейно поляризованной компоненты максимальна при угле отражения около 80 градусов (рис. 2).

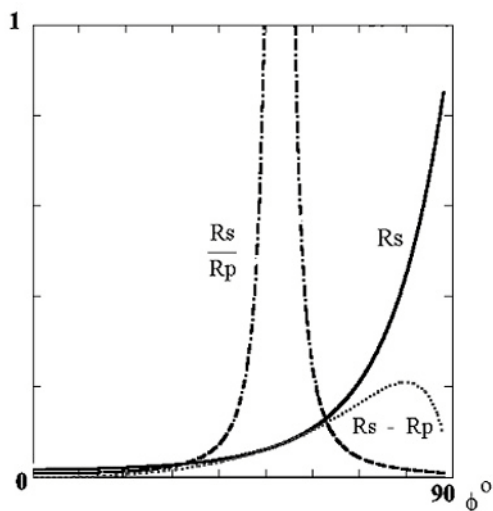


Рис. 2. Угловая зависимость Френелевских компонент коэффициента отражения для морской поверхности $n = 1.34$.

Если свет, отраженный от горизонтальной площадки, пропустить через поляроид-анализатор, то зависимость энергетической яркости B_M от угла ξ определяется как:

$$B_M = B_H(R_S - R_P) \cdot \sin^2(\xi - \beta) + B_H R_P + B_{MD} / 2, \quad (3)$$

где ξ - угол между плоскостью отражения и главной плоскостью поляроида анализатора.

Элементы поверхности ориентированы случайным образом, а так как нормаль отражающей площадки в точке падения лежит в плоскости отражения, то для определения компонент $B_P = B_S \cdot R_P$ и $B_S = B_H \cdot R_S$ необходимо знать угол β . Поскольку яркость неба неизвестна, то для того, чтобы получить значения ϕ и β необходимо провести не менее трех измерений интенсивности поляризационных компонент излучения, отраженного морской поверхностью.

Из выражения (3) следует, что интенсивности поляризационных компонент $A(\lambda)$, $B(\lambda)$ и $C(\lambda)$ при трех различных углах $\xi_B = 0^\circ$, $\xi_A = -\pi/4$ и $\xi_C = \pi/4$ выражаются как:

$$\begin{aligned} A(\lambda) &= B_H(\lambda) \cdot (R_S - R_P) \cdot \sin^2(\xi_A + \beta) + B_H(\lambda) \cdot R_P + B_{MD}(\lambda)/2 \\ B(\lambda) &= B_H(\lambda) \cdot (R_S - R_P) \cdot \sin^2(\xi_B + \beta) + B_H(\lambda) \cdot R_P + B_{MD}(\lambda)/2 \\ C(\lambda) &= B_H(\lambda) \cdot (R_S - R_P) \cdot \sin^2(\xi_C + \beta) + B_H(\lambda) \cdot R_P + B_{MD}(\lambda)/2 \end{aligned} \quad (4)$$

Угол β и интенсивность линейно поляризованной $E(\lambda)$ и неполяризованной $D(\lambda)$ компонент выражаются следующим образом:

$$\beta = \{\arcsin[(C(\lambda) - A(\lambda))/E(\lambda)]\}/2 \quad (5)$$

$$E(\lambda) = B_H(\lambda) \cdot (R_S - R_P) = \sqrt{2 \cdot (C^2 + A^2 + 2 \cdot B^2) - 4(B \cdot C - B \cdot A)} \quad (6)$$

$$D(\lambda) = 2 \cdot B_H(\lambda) \cdot R_P + B_{MD}(\lambda)/2 = [A(\lambda) + C(\lambda) - E(\lambda)]$$

Если выбрать длину волны света λ_0 , так, чтобы $B_{MD}(\lambda_0) \approx 0$ [2], то из решения системы уравнений (6) можно найти следующее представление для отношения R_{SP} :

$$\begin{aligned} R_{SP} &= [2 \cdot E(\lambda_0) + D(\lambda_0)]/D(\lambda_0) \\ \text{В то же время из формул Френеля следует} \\ R_{SP} &= \cos^2(\phi - \psi)/\cos^2(\phi + \psi) \end{aligned} \quad (7)$$

Из формулы (7), и принимая во внимание, что $\sin(\psi) = \sin(\phi)/n$ можно найти решение для ϕ :

$$\phi = \arcsin \left\{ \sqrt{[-\gamma^2 + \gamma^2 n^2 + \sqrt{(\gamma^2 n^2 + \gamma^2)^2 + 4\gamma^2 n^2 (1 - \gamma^2)}]}/\sqrt{2(1 - \gamma^2)} \right\} \quad (8)$$

где $\gamma_1 = (R_{SP} + 1)/(R_{SP} - 1)$ для $\phi > \phi_{Br}$;
 $\gamma_2 = (R_{SP} - 1)/(R_{SP} + 1)$ для $\phi < \phi_{Br}$;
 ϕ_{Br} - угол Брюстера.

В системе координат $OXYaZa$ пространственную ориентацию вектора N можно выразить через угол отражения ϕ и угол β :

$$\begin{aligned} N_X &= \sin(\phi) \sin(\beta) \\ N_{Ya} &= \cos(\phi) \end{aligned} \quad (9)$$

где N_X и N_{Ya} - проекции вектора N на оси OX и OYa соответственно.

Система координат $OXYZ$ получена путем поворота системы $OXYaZa$ вокруг оси OX на угол визирования α . Ось OZ направлена вертикально. Проекция вектора N на координатные оси OX и OY можно записать в виде:

$$\begin{aligned} N_X &= \sin(\phi) \sin(\beta), \\ N_Y &= \cos(\phi) \cdot \cos(\alpha) - \sin(\phi) \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, одновременное измерение трех поляризационных компонент восходящего излучения в спектральной области, где вклад диффузной компоненты несущественен, позволяет определить угол ориентации плоскости отражения β , угол отражения ϕ и пространственную ориентацию N_X и N_Y отражающего элемента поверхности S . Достоинством предложенной методики является то, что во всех соотношениях используются только относительные величины яркостей, которые могут быть измерены с достаточно высокой точностью.

2. Проверка методики в натуральных условиях

2.1. Поляризационная камера, система поплавков

Проверка основных принципов и оценка погрешности предлагаемого метода восстановления геометрических характеристик взволнованной морской поверхности осуществлялась в ходе натуральных испытаний на морской экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН «Мыс Шульца» на берегу Японского моря. В качестве независимого источника данных о характеристиках волнения использовалась система поплавков, находящихся в поле зрения измерительной системы, что обеспечивало синхронность измерений и хорошую пространственную привязку. Съемка морской поверхности проводилась с помощью поляризационной камеры, разработанной автором в ТОИ ДВО РАН [3,4]. На рисунке 3 показана

на оптическая схема камеры, обеспечивающая формирование 3-х поляризационных изображений на её приемной матрице. Светофильтр служит для выделения спектрального интервала 600 – 800 нм. В этом спектральном интервале можно пренебречь диффузной компонентой яркости моря, а выбранные поляроиды имеют приемлемые характеристики.

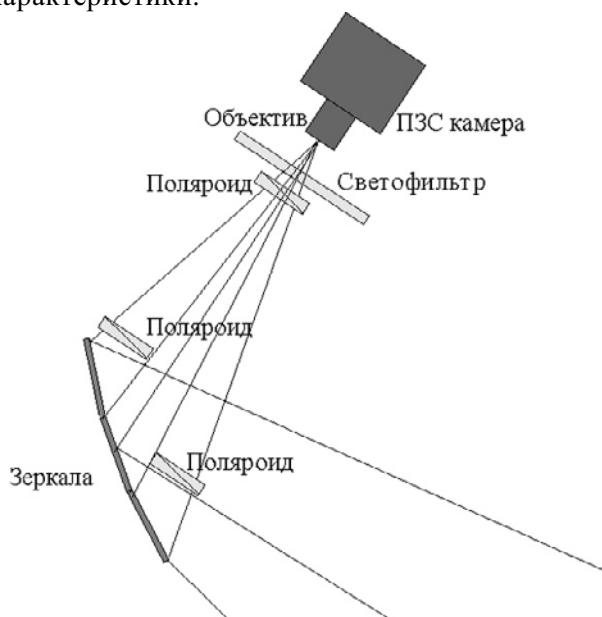


Рис. 3. Оптическая схема поляризационной камеры.

Система поплавков предназначена для контроля достоверности полученных результатов. В поле зрения на поверхности воды расположены сферические поплавки с отверстиями, изготовленные из пенопласта. Поплавки нанизаны на вертикальные направляющие - леска диаметром 0,1 мм. Диаметр поплавков - 10 мм. Концы лески закреплены в вершинах правильных горизонтальных треугольников с размером стороны 10 см. Треугольники расположены на металлическом стержне, на расстоянии 1,5 метра по высоте друг от друга. Система поплавков устанавливалась вертикально в поле зрения камеры. Изображение морской поверхности приведено на рис. 4. Пространственные координаты X и Y для каждого поплавка при перемещении их по вертикальным направляющим не изменяются, поэтому положение поплавков на изображении определяется только параметрами оптической системы и их высотами. Такой способ размещения системы поплавков дает возможность определять их высоты и пространственную ориентацию треугольников, образованных центрами поплавков. Ориентацию этих треугольников можно сравнить с пространственной ориентацией, рассчитанной для них по поляризационным характеристикам элементов изображения, расположенных внутри этих треугольников.

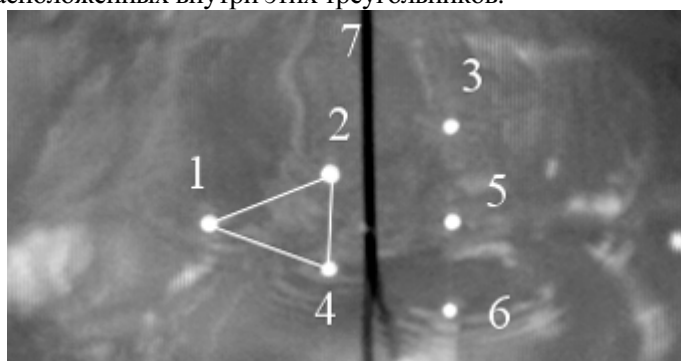


Рис. 4. Изображение морской поверхности с системой поплавков. 1 – 6 поплавки; 7 – металлический стержень; 1-2-4 – треугольник, ориентация которого сравнивается.

2.2. Схема измерений

Измерения проводились в сентябре 2002 года. Камера была установлена на пирсе на высоте 3 м над уровнем моря, угол визирования составлял 60 градусов, фокусное расстояние объектива – 23 мм, в качестве приемника использовалась черно-белая CCD камера ACE 360 с размером матрицы 1/3 дюйма, линейность передаточной характеристики которой была измерена и учитывалась при обработке результатов. Скорость съемки составляла – 25 кадров/сек, или 50 полей/сек. Запись изображений в компьютер осуществлялась с помощью платы видео захвата AVERMEDIATVPhone. Скорость ветра не превышала 2 м/сек. Измерения проводились в условиях сплошной облачности.

Регистрация и анализ изображения осуществлялся с помощью оригинального программного обеспечения, разработанного для этой цели. После регистрации из исходного изображения выделялись три по-

ляризационных изображения, затем для каждого пикселя изображений рассчитывались углы визирования α , углы ориентации плоскости поляризации β , углы отражения ϕ и проекции вектора нормали N_x и N_y . При этом использовались известные соотношения аналитической геометрии.

2.3. Сравнение результатов измерения уклонов двумя независимыми методами

Погрешность определения ориентации треугольников зависит от погрешности определения координат поплавков, точности установки основных параметров оптики и условий съемки. Точность определения координат центров поплавков благодаря применению субпиксельной технологии определения координат поплавков на изображении [5] составляла не менее 0,15 мм. Точность определения ориентации треугольников по положению поплавков составляла не менее 0,1 градуса. На рис. 5 приведены результаты сравнения угла между вертикальной плоскостью и плоскостью, в которой находится вектор нормали выделенной области, и среднего угла β для области треугольника 1-2-4. Коэффициент корреляции этих величин составил 0.936. Это подтверждает работоспособность предлагаемой методики и её программной реализации и говорит о высокой точности определения геометрических характеристик морской поверхности даже при измерениях на малой глубине, когда отчетливо просматривается морское дно.

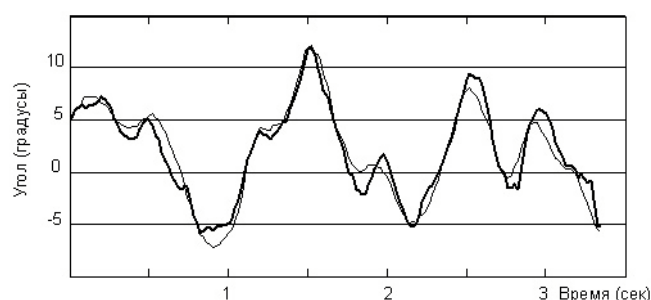


Рис. 5. Сравнение углов наклона треугольника 1-2-4 (чёрный цвет) и среднего угла β этой области, рассчитанного по поляризационным характеристикам изображения (серый цвет тонкая линия).

Необходимо отметить, что рассмотренный поляризационный метод более приспособлен для измерения уклонов, поскольку на результаты определения угла отражения влияет гораздо больше факторов, чем на результаты определения ориентации плоскости поляризации β .

Метод анализа поляризационных видеоизображений морской поверхности и его аппаратная и программные реализации с использованием системы поплавков в поле зрения имеют достаточное пространственное разрешение и точность для их использования при исследованиях характеристик морского волнения гравитационно-капиллярного масштаба. В дальнейшем будут рассмотрены возможности реконструкции морской поверхности по результатам поляризационных измерений.

Работы выполнялись в рамках грантов: “ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА НАУЧНЫХ ПРОГРАММ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН В 2002 г.”, “Видеоспектрометр с концентрической дифракционной решеткой для дистанционного зондирования океана”, и гранта INTAS SIMP: “Slicks as Indicators for Marine Processes” INTAS 03-51-4987.

Литература

1. Кизель В.А., Отражение света // М.: Наука, 1973.351 с.
2. O.A. Bukin, A.N. Pavlov, M.S. Permyakov, A. Yu. Major, O.G. Konstantinov, A.V. Maleenok, S. A. Ogay. Continuous measurements of chlorophyll *a* concentration in the Pacific Ocean by shipborne laser fluorometer and radiometer; compared with SeaWiFS data. International Journal of Remote Sensing. 2000.
3. Алексеев И.Ф., Константинов О.Г., Бугрова Т.Б., Пискун И. . Способ дистанционного измерения характеристик волнения водных поверхностей. А.С. № 1549310 от 18.02 1988.
4. Константинов О.Г., Оптический поляризационный волнограф. ВТОРОЙ ВСЕРОССИЙСКИЙ СИМПОЗИУМ “СЕЙСМОАКУСТИКА ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН” Владивосток, 03 - 07 сентября 2001 г.
5. David a Forsyth Jean Ponce, “Computer Vision a Modern Approach”, Moscow p.p.926 February 2004.