

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

*Бакашев
Государственный*

МОСКВА · 1992

УДК 528.854:551.46

© 1992 г. В.Д. БАРАНОВСКИЙ, В.Г. БОНДУР, В.В. КУЛАКОВ,
В.А. МАЛИННИКОВ, А.Б. МУРЫНИН

КАЛИБРОВКА ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДВУМЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СПЕКТРОВ ВОЛНЕНИЯ ПО ОПТИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Разработана методика экспериментальной проверки адекватности дистанционного измерения спектров морского волнения в гравитационном и гравитационно-капиллярном диапазонах путем сопоставления с данными контактных и стереофотограмметрических измерений.

Оптические изображения (ОИ) являются надежным источником информации для определения пространственных спектров возвышений (СВ) морской поверхности (МП) в широком диапазоне длин волн [1, 2]. В последнее время разработаны методы восстановления СВ, учитывающие нелинейный характер модуляции регистрируемого на ОИ сигнала уклонами поверхности (градиентами поля возвышений) и, следовательно, позволяющие измерять СВ с высокой точностью при использовании ОИ, полученных в широком диапазоне условий освещения [3–5]. В настоящей работе решается задача экспериментальной проверки адекватности измерения спектров волнения этими методами.

Нелинейный многопозиционный метод восстановления двумерных СВ, изложенный в [3, 4], основан на выделении в ОИ нескольких ($M > 2$) фрагментов, соответствующих различным условиям освещения и визирования (предполагается, что представленные на фрагментах участки МП принадлежат одному статистическому ансамблю), либо регистрации нескольких ОИ одного и того же участка МП с разных позиций (например, при стереофото съемке). По спектрам выделенных фрагментов $S^{(m)}(\vec{k})$, $m = 1, \dots, M$ ($\vec{k} = (k_x, k_y)$ – волновой вектор) с помощью восстанавливающих операторов $R^{(m)}$, учитывающих условия формирования сигнала в выделенных фрагментах ОИ, восстанавливаются спектры уклонов МП $\Phi^{(m)}(\vec{k}) = R^{(m)} S^{(m)}(\vec{k})$. Двумерный СВ определяется по формуле

$$\Psi(\vec{k}) = \sum_{m=1}^M \Phi^{(m)}(\vec{k}) / \sum_{m=1}^M (\cos \varphi_c^{(m)} k_x + \sin \varphi_c^{(m)} k_y)^2,$$

где $\varphi_c^{(m)}$ – ориентации градиентов средних сигналов в фрагментах ОИ.

В [5] предложен метод оценки СВ, основанный на фрактальном анализе изолиний сигнала в ОИ и позволяющий восстанавливать степенной показатель p в аппроксимации спектра $\Psi \sim |\vec{k}|^{-p}$ в ситуациях, когда передаточная функция, связывающая уклоны элементов МП с их яркостями, априорно неизвестна. Такая ситуация имеет место при регистрации ОИ в условиях импульсной подсветки [6], поскольку в этом случае передаточная функция определяется физическими процессами, характеристики которых трудно измерить дистанционно – рассеянием света на шероховатых элементах МП и в водной толще [3, 7].

Упомянутые методы измерения СВ основаны на численном моделировании изображений МП при различных условиях. Такое моделирование является сложной многопа-

раметрической задачей, поэтому требуется тщательная экспериментальная проверка разработанных методов. Для проверки адекватности восстановления СВ по изображениям необходимо сопоставить получаемые результаты с данными синхронных измерений характеристик поля возвышений МП – в нашем случае с данными контактных и стереофотограмметрических измерений. Стереофотограмметрическая обработка синхронно зарегистрированных с двух различных точек ОИ позволяет непосредственно измерять реализации поля возвышений МП в фиксированные моменты времени, а по ним вычислять СВ. Получение двумерных реализаций поля возвышений МП с высоким пространственным разрешением затруднительно ввиду высокой трудоемкости процедуры обработки стереоизображений. Поэтому на практике при исследовании высокочастотного волнения, целесообразно ограничиться измерением одномерных реализаций поля возвышений [8]. Для решения поставленной задачи будем использовать также данные контактных измерений волнения струнным волнографом, регистрирующим возвышение МП в фиксированной точке в зависимости от времени. По этим данным определяется частотный спектр волнения $s(\omega)$, характеризующий распределение волновой энергии в этой точке по частотам $\omega = 2\pi/T$ (T – период волны).

Таким образом, спектры волнения, получаемые различными методами, различны: при восстановлении по ОИ – двумерные пространственные, при стереофото съемке – одномерные пространственные, при контактных измерениях – частотные. Поэтому необходима разработка специальной методики сопоставления характеристик этих спектров.

Частотный спектр возвышений МП $s(\omega)$ связан с пространственным спектром волновых чисел $\chi(k)$ соотношением [9]: $\chi(k) = s(\omega(k)) d\omega(k)/dk$, где $\omega(k)$ – дисперсионное соотношение, $k = |\vec{k}| = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны. С другой стороны, одномерный спектр $\chi(k)$ может быть получен из двумерного СВ $\Psi(\vec{k})$: $\chi(k) = \int \Psi(\vec{k}) |\vec{k}| d\varphi$, где $\varphi = \arctg(k_y/k_x)$.

Расчет $\Psi(\vec{k})$ по $\chi(k)$ в общем случае невозможен. Поэтому именно спектр $\chi(k)$ удобно выбрать в качестве базовой функции и переводить спектры, получаемые при различных методах измерений, в спектр $\chi(k)$ с помощью соответствующих преобразований.

Одномерная реализация поля возвышений $h_\varphi(x)$, измеряемая при стереофотограмметрической обработке ОИ, представляет собой разрез двумерного поля возвышений $z = \xi(x, y)$ в заданном направлении φ : $h_\varphi(x') = \xi(x' \cos \varphi, x' \sin \varphi)$ (x, y, z – прямоугольная декартова система координат, в которой плоскость (x, y) совпадает с гладкой (невзволнованной) поверхностью). Компоненты СВ $\Psi(\vec{k})$ пропорциональны квадратам амплитуд (мощностям) гармоник волны с волновым числом $k = |\vec{k}|$, распространяющихся в направлении φ [9], соответственно компоненты спектра $\psi_\varphi(k_\varphi)$ одномерного разреза $h_\varphi(x')$ представляют суммарные мощности всех гармоник с волновыми векторами \vec{k} , имеющими проекцию k_φ на направление разреза. Это означает, что одномерный спектр $\psi_\varphi(k_\varphi)$ является проекцией двумерного спектра для данного направления. Чтобы выразить $\psi_\varphi(k_\varphi)$ через $\Psi(\vec{k})$, введем вспомогательную прямоугольную систему координат (k_φ, k') , связанную с (k_x, k_y) поворотом на угол φ . В результате получим

$$\psi_\varphi(k_\varphi) = \int_k^{-k_N} \Psi(k_\varphi \cos \varphi - k' \sin \varphi, k' \cos \varphi + k_\varphi \sin \varphi) dk'.$$

Ограничимся рассмотрением степенных спектров вида $\chi(k) = a_\chi k^{-p_\chi}$, где a_χ, p_χ – параметры аппроксимации. В высокочастотной спектральной области $k \gg g/u^2$ (u – скорость ветра, g – ускорение свободного падения) угловое распределение энергии в СВ близко к равномерному [9, 10]. Поэтому двумерный СВ $\Psi(\vec{k})$, соответствующий спектру $\chi(k)$, можно считать изотропным, $\Psi(\vec{k}) = a_\psi k^{-p_\psi}$. Это позволяет получить следующее выражение для параметров спектра $\chi(k)$: $a_\chi = 2\pi a_\psi, p_\chi = p_\psi - 1$.

Выполняя интегрирование по k' можно определить параметры степенной аппроксимации одномерного СВ $\psi_\varphi(k_\varphi) = a_\varphi k_\varphi^{-p_\varphi}$: $p_\varphi \approx p_\chi', a_\varphi = (a_\chi/2\pi) f_\varphi(k', p_\chi)$, где

f_φ — весовая функция, зависящая от показателя p_χ . Можно показать, что в высокочастотной спектральной области справедливы оценки: $p_\chi = p_\varphi$, $a_\chi = (2,33 \pm 0,05) a_\varphi$ при практически важном для решаемой задачи диапазоне изменения показателя $p_\chi \in (2,3)$.

Для определения связи параметров степенной аппроксимации частотного СВ $s(\omega) = a_\omega \omega^{-p_\omega}$ с соответствующими параметрами спектра $\chi(k)$ необходимо учесть дисперсионное соотношение $\omega(k)$. Для гравитационных волн $\omega^2 = gk$, параметры можно рассчитать по формулам [9]: $a_\chi = \frac{1}{2} a_\omega g^{(1-p_\omega)/2}$, $p_\chi = (p_\omega + 1)/2$. В гравитационно-капиллярном диапазоне волнения дисперсионное соотношение имеет вид $\omega^2 = gk + (\mathcal{F}/\rho) k^3$, где \mathcal{F} , ρ — коэффициент поверхностного натяжения и плотность воды. Для определения параметров a_χ , p_χ частотный спектр $s(\omega)$, измеренный в эксперименте, преобразуется в $\chi(k)$ численно, после чего строится степенная аппроксимация $\chi(k)$ в заданном интервале волновых чисел k .

Интегральной характеристикой МП в заданном интервале волновых чисел (k_1, k_2) является полная спектральная энергия, которая может быть определена интегрированием спектра $\chi(k)$. Эта энергия равна дисперсии возвышений МП — σ_ξ^2 , связанной с волнением в выбранном интервале k . Поэтому в качестве энергетической характеристики

удобно использовать среднеквадратичное возвышение МП в интервале (k_1, k_2) :

$$\sigma_\xi = \sqrt{\int_{k_1}^{k_2} \chi(k) dk}.$$

Для проверки адекватности нелинейных методов восстановления СВ по изложенной методике были использованы данные комплексных натуральных экспериментов на гидрофизической платформе, включавших стереофотосъемку и контактные измерения СВ. Рабочая площадка находилась на высоте 16 м над уровнем моря. Стереофотосъемка МП выполнялась с базисом 10,2 м с помощью стереокамер UMK-10/1318 (фокусное расстояние 99 мм). Изображения регистрировались на фотопластинках чувствительностью 360 ед. ГОСТ с выдержкой 1/250 с при относительном отверстии объектива 1/8. Измерения координат x , y , z элементов МП по стереопарам выполнялись на стереокомпараторе "Стекометр". По измеренным отсчетам поля возвышений рассчитывались спектры $\psi_\varphi(k_\varphi)$ с использованием процедур интерполяции и дискретного преобразования Фурье [8]. Одновременно со стереофотосъемкой на платформе выполнялись контактные измерения частотных СВ с помощью спектроволнографа, обеспечивающего регистрацию в частотном диапазоне 0,1–15 Гц с полосой пропускания перестраиваемого фильтра 0,1 Гц. В спектроволнографе реализован метод последовательного анализа частотного спектра путем автоматической перестройки частоты пропускания узкополосного фильтра в заданном интервале.

Изображения МП, полученные при стереофотосъемке, использовались также для восстановления СВ нелинейными методами, упомянутыми выше. При этом анализировались фрагменты двух изображений стереопары, на которых представлен тот же участок МП, обработанный стереофотограмметрическим методом.

Условия комплексных экспериментов: зенитный угол Солнца $\approx 30^\circ$ (изображения зарегистрированы при безоблачном небе); скорость ветра $u \approx 5$ м/с. Во время экспериментов ветер дул со стороны берега, поэтому разгон ветрового волнения не превышал расстояния от платформы до берега, которое составляет $\sim 0,5$ км.

В качестве основных характеристик для сопоставления СВ, измеренных разными методами, были выбраны среднеквадратичное возвышение σ_ξ и степенной показатель p_χ в двух интервалах длин волн Λ : от 0,1 до 1 м и от 0,04 до 0,4 м. Спектры МП, измеренные различными методами, пересчитывались в спектр $\chi(k)$ по изложенной выше методике. Для различения оценок СВ, полученных разными методами, примем следующие обозначения: (Р) — нелинейное многопозиционное восстановление СВ по ОИ, (Из) — восстановление степенных показателей СВ по изолиниям сигнала, (Ст) —

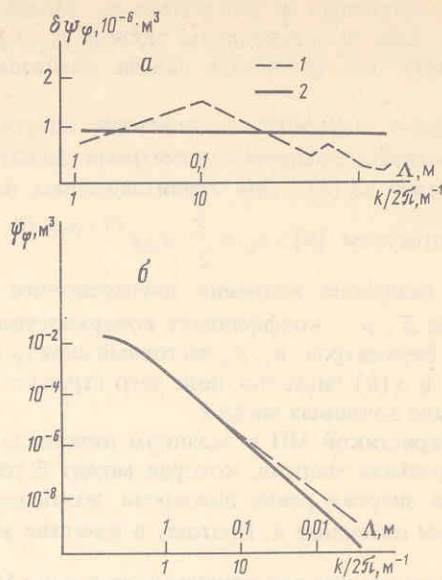


Рис. 1. Оценка пространственного спектра шумов стереофотограмметрических измерений возвышений морской поверхности (а): 1 — спектр шумов, рассчитанный по четырем независимым измерениям профиля МП, 2 — линейная аппроксимация спектра; вид оценки спектра одномерного разреза поля возвышений МП до и после вычитания спектра шума (б) (соответственно кривые 1, 2)

измерения стереофотограмметрическим методом (ниже для краткости — “стереометод”, (К) — контактные измерения СВ, (А) — известные из литературы аппроксимации спектров МП.

При восстановлении СВ учитывались статистические и систематические погрешности, возникающие на различных этапах регистрации и обработки ОИ. Учитывались шумы фотошленки, шумы устройства ввода изображений в ЭВМ). Было установлено, что отношение спектральной плотности полезного сигнала к спектральной плотности шумов составляет не менее одного порядка при длине волны на МП $\Lambda = 4$ см и достигает двух-трех порядков при $\Lambda \sim 1$ м.

Систематические погрешности восстановления спектров МП возникают вследствие наличия в изображении солнечных бликов, служащих причиной существенной нелинейности передаточной функции, связывающей уклоны и яркости элементов МП. Систематические погрешности устранялись при помощи нелинейных восстанавливающих фильтров, адаптируемых к характеристикам волнения с использованием итерационной процедуры восстановления спектров МП. Количественные оценки этих погрешностей приводились в работах [3, 11], где показано, что даже при использовании изображений, содержащих солнечные блики, двух итераций восстановления достаточно для снижения относительной погрешности измерения интегральной спектральной энергии до $\approx 3\%$ и погрешности определения показателя степенной аппроксимации спектра МП до величины $\approx 0,03$.

Для коррекции СВ, полученных стереометодом, были учтены шумы оцифровки, возникающие вследствие погрешностей измерения возвышений поверхности при стереофотограмметрической обработке ОИ. Спектр шумов был определен по результатам обработки четырех независимых измерений одного и того же профиля МП (длина каждой выборки 4096 отсчетов, шаг дискретизации на МП 2,5 мм). Измеренный спектр шумов показан на рис. 1,а. Предполагалось, что шумы являются аддитивными, поэтому их спектр был вычтен из спектров, измеренных при обработке ОИ (см. рис. 1,б).

Аналогичным образом при расчете параметров σ_ξ и p_χ по данным контактных изме-

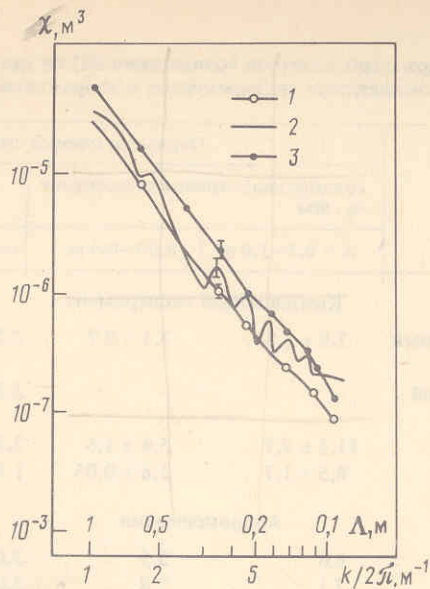


Рис. 2. Оценки спектра МП по данным разных методов измерений: 1 – восстановление по изображениям нелинейным многопозиционным методом, 2 – контактные измерения, 3 – стереофотограмметрические измерения

рений учитывалось искажение спектров при регистрации их волнографом. При этом использовалась модель аддитивного белого шума со спектральной плотностью, составляющей в среднем $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Вид оценок спектра $\chi(k)$ по данным разных методов измерений показан на рис. 2. Спектры построены усреднением по шести реализациям.

Расчитанные значения параметров σ_ξ , p_χ по данным шести комплексных экспериментов для двух диапазонов Λ приведены в табл. 1. Для сопоставления с известными литературными данными были вычислены параметры σ_ξ , p_χ по следующим аппроксимациям: Филлипса [12], Пирсона–Московица [10], Тоба [13], Лейкина и Розенберга [14, 15]. Результаты расчетов также приведены в табл. 1.

Значения показателя $p_\chi^{(Ст)}$, определенные стереометодом, в среднем хорошо согласуются со значениями $p_\chi^{(Р)}$, $p_\chi^{(Иэ)}$, полученными при восстановлении СВ по ОИ нелинейными методами. Однако расчитанные стереометодом среднеквадратичные возвышения МП – $\sigma_\xi^{(Ст)}$ превосходят как $\sigma_\xi^{(Р)}$, так и $\sigma_\xi^{(А)}$. Наличие такого расхождения, видимо, связано с неучтенными систематическими погрешностями стереофотограмметрических измерений возвышений МП, имеющими неаддитивный характер. Такие погрешности могут быть обусловлены влиянием условий освещения на результат расчета возвышений МП. Искажения оценок СВ, возникающие вследствие неаддитивных погрешностей, не могут быть скорректированы на основе имеющихся данных. Для коррекции этих искажений необходимы дополнительные исследования.

Оценки среднеквадратичных возвышений МП – $\sigma_\xi^{(Р)}$, полученные при восстановлении по ОИ, удовлетворительно совпадают с оценками $\sigma_\xi^{(К)}$ по контактными данным. Однако оценки показателя $p_\chi^{(К)}$ в среднем меньше, чем $p_\chi^{(Р)}$, $p_\chi^{(Иэ)}$ и $p_\chi^{(Ст)}$ на $\approx 0,2$. Видимо, это связано с неучтенным влиянием частотной характеристики перестраиваемого фильтра в спектроволнографе.

Оценки показателя СВ – $p^{(Р)}$ и $p^{(Иэ)}$, полученные двумя различными независимыми нелинейными методами восстановления по ОИ, совпадают между собой с хорошей точностью.

Параметры спектров возвышений МП по данным комплексных экспериментов и аппроксимациям

Источник информации	Параметр оценки спектра			
	среднеквадратичное отклонение σ_{ξ} , мм		показатель p_{χ}	
	$\Lambda = 0,1-1,0$ м	$0,04-0,4$ м	$0,1-1,0$ м	$0,04-0,4$ м
	Комплексный эксперимент			
Нелинейный многопозиционный метод	$7,8 \pm 1,3$	$3,1 \pm 0,7$	$2,23 \pm 0,09$	$2,12 \pm 0,08$
Фрактальный анализ изолиний сигнала	—	—	$2,26 \pm 0,10$	$2,14 \pm 0,09$
Стереодатосъемка	$11,3 \pm 2,7$	$5,4 \pm 1,5$	$2,20 \pm 0,17$	$2,10 \pm 0,10$
Контактные измерения	$8,5 \pm 1,7$	$3,8 \pm 0,05$	$1,98 \pm 0,05$	$1,93 \pm 0,11$
	Аппроксимации			
Филлипс [12]	8,6	3,5	3,0	3,0
Пирсон, Москович [10]	7,1	2,8	3,0	3,0
Тоба [13]	7,3	3,7	2,5	2,5
Лейкин, Розенберг [14]	7,0	3,3	2,6	2,6
» [15]	6,4	2,8	2,8	2,8
В среднем	7,3	2,8	2,8	2,8

Измеренные среднеквадратичные возвышения МП — σ_{ξ} для двух диапазонов Λ достаточно точно совпадают со значением $\sigma_{\xi}^{(\Lambda)}$, полученным усреднением по различным аппроксимациям. Измеренные показатели p_{χ} в среднем на $\approx 0,6$ меньше значений показателя в аппроксимациях $p_{\chi}^{(\Lambda)}$. Различие в оценках показателей p_{χ} связано с тем, что в использованных литературных источниках аппроксимации спектров волнения получены при значениях разгона ветрового волнения, существенно (в 10^1-10^2 раз) превышающих значения, имевшие место в описываемых комплексных экспериментах.

Следует отметить, что измеренные значения показателя p_{χ} близки к величине $7/3$, которая получена в теории слабой турбулентности с учетом нелинейных взаимодействий между волнами [16, 17]. Однако теоретический результат соответствует безразмерным волновым числам $\tilde{k} = ku^2/g \leq 4-6$ и большим разгонам волн, в то время как в рассматриваемом случае $\tilde{k} \sim 10^2$ при значительно меньшем разгоне. Поэтому для проверки соответствия полученных результатов указанной теории требуются дополнительные исследования.

В среднем по серии экспериментов наблюдается совпадение оценок параметров СВ, измеренных разными методами, в пределах среднеквадратичных разбросов выборок этих параметров. Это позволяет заключить, что разработанные дистанционные методы достаточно точно определяют средние по времени параметры СВ. Вместе с тем ввиду наличия систематических погрешностей измерений целесообразно дополнительно исследовать зависимость между вариациями оценок параметров СВ для рассматриваемой серии экспериментов. Для выяснения влияния возмущений СВ, связанных с нестационарностью волнения, на получаемые оценки целесообразно воспользоваться корреляционным анализом [18].

Пусть $\eta_n^{(\alpha)}$, $n = 1, 2, \dots, N$, — выборка оценок параметра η , сделанных по результатам измерений методом, обозначенным индексом α , а $\eta_n^{(\beta)}$, $n = 1, \dots, N$, — выборка оценок того же параметра, полученная с использованием метода, обозначенного индексом β . В рассматриваемой задаче индекс η принимает последовательно значения σ_{ξ} , p_{χ} для двух диапазонов длин волн, а индексы α, β принимают значения Я, Из, Ст, К.

Коэффициенты корреляции между оценками параметров спектров возвышений МП (σ_{ξ} и ρ_{χ}) по данным различных методов измерений

Диапазон длин волн, м	Метод измерений	Метод измерений			
		нелинейный многопозиционный	стереофотосъемка	контактный	фрактальный анализ изолиний
σ_{ξ}					
0,1–1,0	Нелинейный многопозиционный	1	0,79	0,73	–
	Стереофотосъемка	0,79	1	0,95	–
	Контактный	0,73	0,95	1	–
0,04–0,4	Нелинейный многопозиционный	1	0,78	0,91	–
	Стереофотосъемка	0,78	1	0,93	–
	Контактный	0,91	0,93	1	–
ρ_{χ}					
0,1–1,0	Нелинейный многопозиционный	1	0,65	0,89	0,99
	Стереофотосъемка	0,65	1	0,86	0,62
	Контактный	0,89	0,86	1	0,88
	Фрактальный анализ изолиний	0,99	0,62	0,88	1
0,04–0,4	Нелинейный многопозиционный	1	0,93	0,64	0,98
	Стереофотосъемка	0,93	1	0,86	0,91
	Контактный	0,64	0,86	1	0,55
	Фрактальный анализ изолиний	0,98	0,91	0,55	1

Коэффициенты корреляции между оценками параметра η , определяются формулой:

$$r^{(\alpha, \beta)} = \frac{\sum_{n=1}^N (\eta_n^{(\alpha)} - \bar{\eta}^{(\alpha)}) (\eta_n^{(\beta)} - \bar{\eta}^{(\beta)})}{\left(\sum_{n=1}^N (\eta_n^{(\alpha)} - \bar{\eta}^{(\alpha)})^2 \sum_{n=1}^N (\eta_n^{(\beta)} - \bar{\eta}^{(\beta)})^2 \right)^{1/2}},$$

где $\bar{\eta}^{(\alpha)}$, $\bar{\eta}^{(\beta)}$ – средние значения оценок $\eta^{(\alpha)}$, $\eta^{(\beta)}$.

Расчитанные коэффициенты корреляции между оценками параметров СВ приведены в табл. 2. Корреляция является достаточно высокой, и составляет в среднем 0,8–0,9. Те случаи, в которых наблюдается понижение корреляции, объясняются особенностями методов измерений. Например, некоторое уменьшение корреляции оценок показателя ρ_{χ} , полученных контактным методом, с оценками, полученными по ОИ, обусловлено разнесением по времени регистрации спектральной плотности $s(\omega)$ на различных частотах ω . За время перестройки частоты пропускания фильтра может происходить изменение спектральной плотности волнения на разных частотах ω , что приводит к отклонению оценки показателя СВ относительно оценок, полученных для фиксированного момента времени при обработке ОИ.

Наличие хорошей корреляции между независимо измеренными параметрами СВ позволяет сделать вывод, что все разработанные дистанционные методы измерений адекватно отображают реальные возмущения СВ. Таким образом, экспериментально подтверждена адекватность дистанционного измерения по ОИ нелинейными методами как средних по времени спектров МП, так и вариаций этих спектров, обусловленных нестационарностью волнения.

Следует отметить существенные преимущества нелинейных методов восстановления спектров по ОИ перед другими рассмотренными методами измерений: в сравнении

со стереометодом — возможность получения двумерного СВ в широком диапазоне волновых чисел оперативно, без трудоемкой обработки; в сравнении с контактным методом — возможность непосредственного измерения двумерных пространственных спектров МП в фиксированный момент времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 376 с.
2. Бондур В.Г. Оперативная дистанционная оценка состояния границы раздела атмосфера — океан по пространственным спектрам изображений // Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987. С. 217—230.
3. Мурынин А.Б. Восстановление пространственных спектров морской поверхности по оптическим изображениям в нелинейной модели поля яркости // Исслед. Земли из космоса. 1990. № 6. С. 60—70.
4. Бондур В.Г., Мурынин А.Б. Восстановление пространственных спектров морской поверхности по оптическим изображениям с учетом нелинейной модуляции поля яркости // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 4. С. 387—395.
5. Мурынин А.Б., Лурия Е.А. Восстановление пространственных спектральных характеристик границы океан — атмосфера по данным оптического зондирования // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 3. С. 299—305.
6. Бондур В.Г., Борисов Б.Д., Генин В.Н. и др. Поле яркости морской поверхности при искусственном импульсном освещении // Перенос изображений в земной атмосфере. Томск, 1988. С. 42—45.
7. Plass G.N., Kattawar G.W. Humphreys T.J. Influence of the oceanic scattering phase function on the radiance // J. Geophys. Research. 1985. V. 20. № 102. P. 3347—3351.
8. Барановский В.Д. Разработка и совершенствование методов определения спектрально-статистических характеристик морского волнения, основанных на применении стереофотограмметрической съемки: Дис. . . канд. техн. наук. Киевский гос. ун-тет, 1990. 184 с.
9. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение как вероятностный гидродинамический процесс. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 287 с.
10. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 256 с.
11. Мурынин А.Б. Параметризация фильтров, восстанавливающих пространственные спектры уклонов морской поверхности по оптическим изображениям // Исслед. Земли из космоса. 1991. № 5. С. 31—38.
12. Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана; Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 319 с.
13. Toba J. Local balance in the air-sea boundary process // Oceanogr. Soc. Japan. 1973. V. 29. P. 209—225.
14. Лейкин И.А., Розенберг А.Д. Измерение высокочастотного спектра океанских волн с дрейфующего судна // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1987. Т. 23. № 11. С. 1188—1192.
15. Leykin I.A., Rozenberg A.D. Sea-Tower measurements of wind-wave spectra in the Caspian Sea // J. Phys. Oceanogr. 1984. V. 14. P. 168—176.
16. Захаров В.Е., Заславский М.М. Форма спектра энергонесущих компонент водной поверхности в слаботурбулентной теории ветровых волн // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 3. С. 282—291.
17. Захаров В.Е., Заславский М.М. Зависимость параметров волн от скорости ветра, продолжительности его действия и разгона в слаботурбулентной теории ветровых волн // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 4. С. 406—416.
18. Дюран Б., Оден П. Кластерный анализ. М.: Статистика, 1977. 127 с.

Центральное научно-производственное
объединение "Комета", Москва

Материал поступил в редакцию
10.09.91

Киевский государственный университет
Московский институт инженеров
геодезии, аэрофотосъемки и картографии

CALIBRATION OF REMOTE MEASUREMENTS OF 2-D SPATIAL WAVE SPECTRA
FROM OPTICAL IMAGES

Central Research and Production Association "Kometa", Moscow; Kiev State University;
Moscow Institute of Engineers of Geodesy, Aerial Photography and Cartography

The paper describes a technique for testing the accuracy of remote measurements of seawave spectra in the gravity range and gravity-capillary range by comparing them with point measurements in situ and with stereophotogrammetry data. The technique was used to analyze integrated remote-contact experimental data to check the efficiency of nonlinear methods for reconstruction of 2-D wave spectra from optical images.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ