

УДК 528.854:873.044.528.88

В. В. Паненко

Таврійський національний університет ім. В. І. Вернадського, Сімферополь

О гибридных аналогово-цифровых методах обработки аэрокосмических изображений морской поверхности

Зроблено огляд основних робіт з відображення рельєфу морських хвиль на фотографічних і радіолокаційних зображеннях. Розроблено спеціалізовані прилади для обробки зображень методом оптичного фур'є-перетворення: когерентно-оптичний аналізатор зі світловодом, призначеним для зменшення спеклових шумів, імерсійна чарунка, суміщена з фур'є-лінзою. Розроблено та виготовлено сканер для реєстрації просторових спектрів у полярній системі координат. Застосовано цифрові методи для розрахунку та корекції параметрів морських хвиль. Оброблено дані експедицій з аерозйомки морської поверхні в Чорному і Баренцовому морях. Досліджено супутникове зображення Охотського моря.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие аэрокосмических методов позволило получать информацию о морском волнении в глобальных масштабах [3, 5, 7] в виде оптических или радиолокационных изображений, что расширило возможности использования природных сред для навигации, разведки зон продуктивности Мирового океана и составления метеорологических прогнозов. Стали актуальными задачи оперативной обработки изображений с целью получения количественной информации о параметрах волнения [2, 4]. Для обработки изображений моря перспективно применение гибридных оптико-цифровых методов [11—13]. Вопросы получения количественной информации по изображениям должны также опираться на развитие теории отображения рельефа морских волн в изображениях [2—5, 11—14]. Возможность определения параметров морских волн по их изображениям основана на зависимости светового потока, идущего от поверхности моря, от уклонов разрешаемых элементов волн. В работе [14] показано, что не разрешаемые мелкие элементы морских волн оказывают усредняющее действие в эффектах отражения от морских волн света неба и Солнца. С целью совершенствования методов обработки были разработаны принципы сканирования пространственных спектров изображений в поляр-

ной системе координат [1]. Для реализации этих принципов был разработан сканер [12], управляемый от компьютера. Настоящая работа посвящена развитию техники обработки спектров изображений, вопросам преобразования и коррекции с использованием как аналоговой, так и цифровой техники.

КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКИЙ ФУРЬЕ-АНАЛИЗАТОР

На рис. 1 показана схема когерентно-оптического фурье-анализатора (КОА) в сходящемся пучке, которая удобна тем, что позволяет легко изменять масштаб спектра и при необходимости переходить к схемам пространственной фильтрации. Новым элементом в анализаторе является колеблющийся световод, который позволяет снижать спекловые шумы пространственных спектров. КОА содержит элементы: 1 — гелий-неоновый лазер, 2 — микрообъектив для ввода луча в торец световода, 3 — многомодовый световод, 4 — звуковой генератор, 5 — вибратор, 6 — микрообъектив, 7 — точечная диафрагма, 8 — диафрагма, 9 — фурье-линза, 10 — транспарант с изображением, 11 — выходная плоскость, 12 — регистрирующий элемент, в качестве которого в зависимости от цели обработки могут использоваться приборы: сканер с ФЭУ и

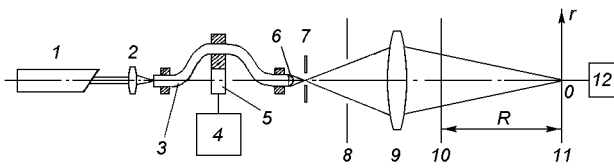


Рис. 1. Оптическая схема когерентно-оптического фурье-анализатора

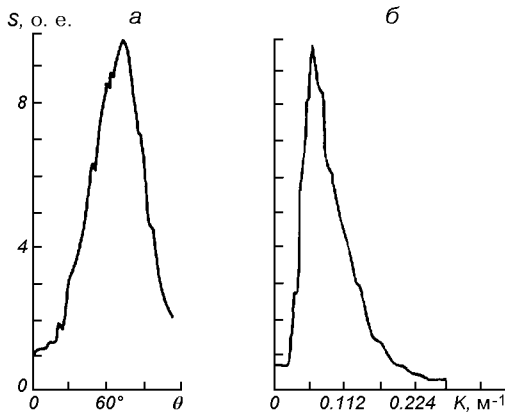


Рис. 2. Одномерные пространственные спектры изображений моря: *a* — угловой спектр, *б* — пространственно-частотный

АЦП, связанным с компьютером; цифровая телевизионная камера; цифровой фотоаппарат; графопостроитель Н-307. Свет лазера 1, проходя через световод 3, собирается микрообъективом 6 в точечное изображение в центре диафрагмы 7. Фурье-линза 9 строит изображение этого точечного источника в выходной плоскости 11. Свет, дифрагирующий на транспаранте, образует поля пространственного спектра, симметричные относительно центра. Они содержат спектральную характеристику поля морского волнения, которая может быть представлена одномерными спектрами, показанными на рис. 2. Одномерный угловой спектр (рис. 2, *a*) дает направление бега гармоник морских волн. Одномерный пространственно-частотный спектр (рис. 2, *б*) определяет распределение энергии в зависимости от пространственной частоты гармоник морских волн, максимуму кривой соответствуют гармоники энергонесущих волн. Для получения одномерных спектров в качестве выходного устройства 12 в КОА использовался сканер, который может сканировать лазерный свет в полярной системе координат. Он удобен для описания пространственных спектров, поскольку они имеют центральную симметрию. Сканер как многофункциональное оптическое устройство является необходимым прибором

при проведении исследовательских работ при использовании КОА. Внешний вид сканера показан на рис. 3, прибор изготовлен по нашей разработке и подробно описан в работе [12].

На рис. 4 показан двумерный пространственный спектр, полученный в КОА с вибрирующим многомодовым световодом. Даже при небольшом изгибе световода происходит случайное изменение амплитуд и фаз мод световода при сохранении когерентности света. При непрерывном, случайном колебании световода в кольце вибратора 5 КОА, происходит снижение контраста спектров, что хорошо видно на рис. 4. Измерения показали, что при частоте вибрации 100—300 Гц уровень спеклов шумов снижается в 5—6 раз. Рис. 2 и 4 относятся к эксперименту, который проводился в Баренцовом море и описан в работе [2]. Радиолокатор бокового обзора с горизонтальной поляризацией был установлен на борту самолета-лаборатории Ан-24. С высоты 1800 м на трассе полета 345 км справа от курса в полосе 15 км производилась фоторегистрация сечения обратного рассеяния радиоволн на горизонтальной поляризации излучения и приема. На рис. 2 волновое число равно $K = 2\pi\Lambda^{-1}$, где Λ — длина волны гармоники морской волны. Для максимума кривой рис. 2, *б* длина энергонесущих морских волн равна 106 м. Используя дисперсионное соотношение для морского волнения $(g/K)^{1/2} = (0.8—9)W$ [15], можно оценить скорость ветра W . Расчет дает численное значение 13 м/с, что близко к 15 м/с по данным наземных измерений в районе эксперимента.

В работе [5] методом КОА были исследованы изображения периодических полей яркости в районе Охотского моря, полученные с ИСЗ «Метеор» бортовым комплексом МСУ-С. Чтобы получить пространственные спектры таких изображений пришлось применить длинно-базовый КОА с $R = 8$ м. Полученный спектр дал три системы волн с длиной 1.2, 1.9 и 3 км, что явилось полезной информацией для исследования явлений в том районе. Опыт показал, что КОА позволяет исследовать весьма сложные изображения.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И КОРРЕКЦИЯ ОДНОМЕРНЫХ СПЕКТРОВ

Интерпретация спектров, полученных по изображением моря, основывается на теориях отображения рельефа волн на фотографиях [10, 16]: интенсивность света, отраженного от элементарной площадки в направлении фотокамеры, зависит от наклона разрешаемых элементов волн: $u(x_0, y_0)_\varphi = \Gamma(\beta)L(\varepsilon)$,

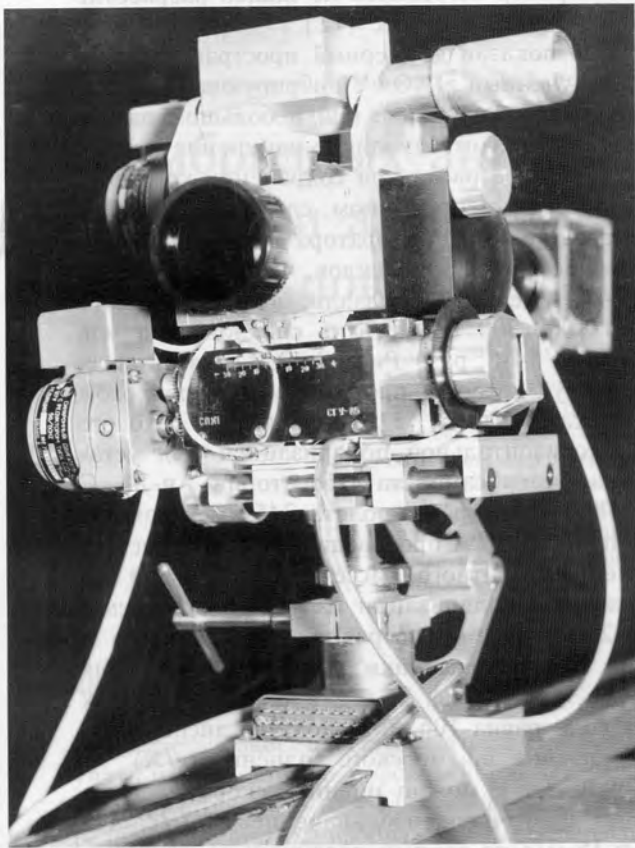


Рис. 3. Внешний вид сканера

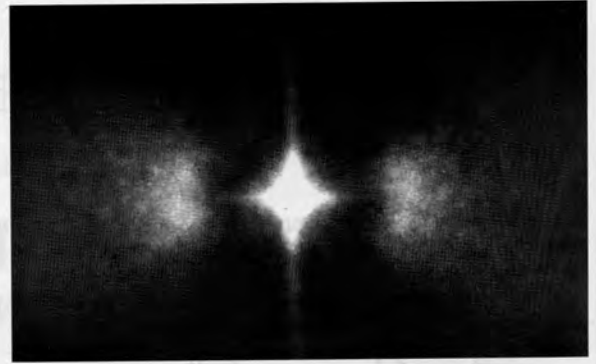


Рис. 4. Двумерный пространственный спектр радиолокационного изображения моря

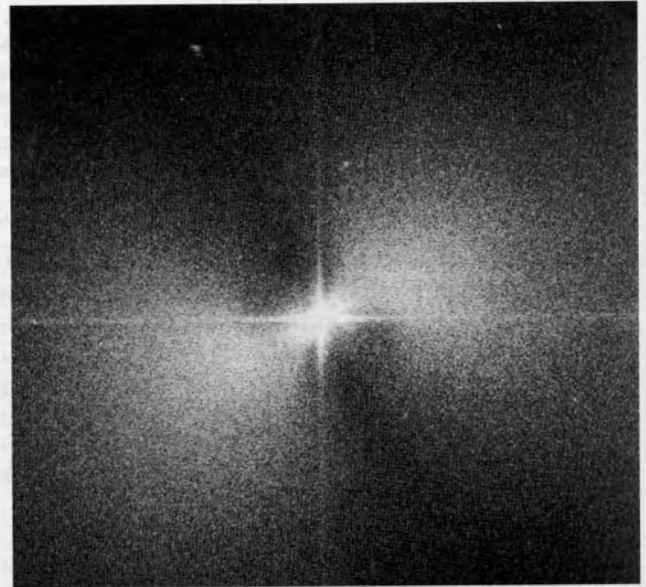


Рис. 5. Двумерный пространственный спектр оптического изображения моря (МКФ-6)



Рис. 6. Иммерсионная ячейка, совмещенная с фурье-линзой для снимков МКФ-6

где β — угол падения, а $\Gamma(\beta)$ — френелевский коэффициент отражения, $L(\varepsilon)$ — яркость неба, которая зависит от его состояния, ε — зенитный угол падающего луча. В теориях отображения, считая углы наклона волн малыми, разлагают функцию u в ряд относительно $\varphi = 0$ и в первом приближении ограничиваются двумя членами:

$$u(x_0, y_0) \approx u(x_0, y_0)_{\varphi=0} + [u_{\varphi}(x_0, y_0)]' \cdot \varphi, \quad (1)$$

где φ — угол между нормалью к площадке разрешения и осью z ; x_0 и y_0 — координаты горизонтальной плоскости. Из (1) следует, что яркость элементов волн пропорциональна их уклонам. В работе [3] показано, что модуляция сечения радиолокационного рассеяния при больших углах падения также обусловлена уклонами крупных волн.

Одной из наиболее важных задач спектрального метода морского волнения [6] является установление зависимости между спектром уклонов $S(k, \theta)$ и спектром высот $S_h(k, \theta)$. Здесь k — волновое число, θ — полярный угол, $h = z$ — высота. В рамках использованной линейной гидродинамической модели для стационарных волновых полей установлено, что справедливо приближенное соотношение $S(k, \theta) = k^2 \cdot S_h(k, \theta)$ [6], пользуясь которым можно преобразовать спектр уклонов в спектр высот $S_h(k, \theta) = S(k, \theta) \cdot k^{-2}$. Процедуру пересчета целесообразно выполнять с помощью компьютера, работая с массивами, полученными при сканировании.

Изображающие системы не идеальны. На качество изображений оказывает влияние слой атмосферы, вибрации аэрофотоаппарата, объектив и регистрирующий материал. Те факторы, которые имеют характер систематических ошибок (ФПМ объектива и фотопленки), можно учесть, и тем самым повысить точность информации, получаемой из анализа спектров. При аэрофотосъемке функция яркости $u(x_0, y_0)$, отображающая рельеф моря, трансформируется объективом в изображение $u(x, y)$, отображаемое фотопленкой. На основании теоремы о свертке можно показать, что скорректированный спектр высот можно получить по формуле

$$S_h(k, \theta)_{\text{кор}} = S(k, \theta) \cdot (k \cdot H \cdot P)^{-2}, \quad (2)$$

где $S(k, \theta)$ — измеренный по фотографиям спектр уклонов волн, H — ФПМ объектива, P — ФПМ фотопленки.

На рис. 5 показан двумерный пространственный спектр, полученный по изображению Черного моря при фотографировании камерой МКФ-6 с высоты 3000 м в самолетном эксперименте. Видно, что на море наблюдалось сложное ветровое волнение. Длина энергонесущих ветровых волн составляла

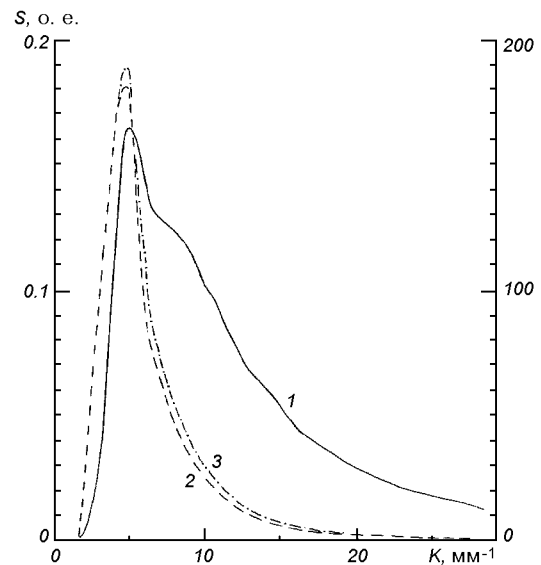


Рис. 7. Преобразование и коррекция одномерных спектров: 1 — спектр уклонов, 2 — спектр высот волн, 3 — спектр высот после коррекции на МПФ объектива и пленки

3 м, на спектре просматриваются волны зыби с большей длиной волны. Спектр был получен без подавления спекловых шумов, это видно на нем. Можно также сравнить этот спектр с показанным на рис. 2, при получении которого спекловые шумы подавлялись колебаниями световода. При получении одномерного спектра подавление спеклового шума в этом случае осуществлялось по методу цифровой медианной фильтрации по соответствующим программам. Кроме указанных методов подавления спекловых шумов, нами использовался еще метод иммерсионных жидкостей (авиационный керосин), при котором фотопленка помещается в жидкость с показателем преломления, примерно равным показателю преломления эмульсионного слоя. Специально для обработки снимков камеры МКФ-6 была разработана иммерсионная ячейка, совмещенная с фурье-линзой.

На рис. 6 показана такая ячейка, слева — корпус с окнами из двух половинок фурье-линзы, справа — кадровая рамка и держатель. Все металлические детали сделаны из титана; линзы клеивались в корпус желатиновым клеем. Для того чтобы применить ячейку в КОА, нужно из схемы рис. 1 убрать элементы 3, 4, 5, 6 и заменить фурье-линзу 9 иммерсионной ячейкой с ее фурье-линзой. Результаты коррекции и преобразования спектров даны на примере спектра, показанного на рис. 5. Расчеты сделаны для пленки Тип 18 и объектива МКФ-6 «Пинатар», использовалась формула (2), простран-

ственная частота анализатора рассчитывалась по формуле $k = r(\lambda R)^{-1}$, где r — радиус в фурье плоскости, R — базис дифракции (рис. 1), λ — длина волны лазерного света.

Результаты расчета приведены на рис. 7, из которого видно, что все факторы влияют на функцию спектральной плотности $S(k)$. Кривая 1 на рис. 7 представляет собой одномерный пространственно-частотный спектр в масштабе КОА, соответствующий двумерному спектру, показанному на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные выше применения показывают высокую эффективность аналоговой техники в виде КОА. Скорости ввода и вывода в аналоговых и цифровых системах обработки изображений примерно одинакова. Цифровые системы проигрывают в скорости получения фурье-спектров. Если в КОА использовать пространственный модулятор типа свет-свет [8] для ввода изображений в реальном масштабе времени, то аналоговые системы по скорости обработки значительно превзойдут цифровые системы.

Опыт показывает также высокую эффективность аэрометодов для дистанционного измерения параметров волнения в регионах. Глобальную информацию о морском волнении в Мировом океане могут дать спутниковые системы. Реальное разрешение МКФ-6 при съемке с высоты 260—270 км составляет 20 м при контрасте 0.1 [9], что достаточно для регистрации изображений океанских волн [7].

Есть необходимость совершенствовать теорию отображения рельефа морских волн на фотографиях с учетом ФПМ слоя атмосферы между поверхностью моря и фотоаппаратом.

1. Бондур В. Г., Паненко В. В. и др. Об оптимизации вида сканирования в задачах цифровой обработки пространственных спектров // Всесоюз. конф. «Микропроцессоры-85»: Тез. докл. 1985.—С. 30—31.
2. Бункин Ф. В., Воляк К. И., Ляхов Г. А. и др. Трассовые измерения морского волнения самолетным радиолокатором бокового обзора // Исслед. Земли из Космоса.—1983.—№ 5.—С. 22—30.
3. Воляк К. И. Определение характеристик волнения по радиоизображениям моря // Исслед. Земли из Космоса.—1982.—№ 6.—С. 86—94.
4. Воляк К. И., Паненко В. В. и др. Точное определение параметров волн по данным фурье-анализа радиоизображений морской поверхности // Исслед. Земли из Космоса.—1986.—№ 4.—С. 11—20.

5. Гришин Г. А., Гектин Ю. М., Селиванов А. С. и др. Исследование яркостной структуры спутникового изображения Охотского моря // Исслед. Земли из Космоса.—1983.—№ 5.—С. 3.
6. Давидан И. Н., Лопатухин Л. Н., Рожков В. А. Ветровое волнение как вероятностный гидродинамический процесс. — Л.: Гидрометеиздат, 1978.—287 с.
7. Егоров В. В. Арумов Г. П. Изучение пространственной структуры изображений земной поверхности // Многозональные аэрокосмические съемки Земли: Сб. ст. ИКИ АН СССР. — М.: Наука, 1981.—С. 235.
8. Захаров И. С. Пространственно-временные модуляторы света. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1983.—264 с.
9. Зиман Я. Л., Чесноков Ю. М. и др. Основные итоги эксперимента «Радуга» // Многозональные аэрокосмические съемки Земли: Сб. ст. ИКИ АН СССР. — М.: Наука, 1981.—С. 5—13.
10. Мовчан В. Н., Дервянко В. Г. Направленные спектры взволнованной водной поверхности по фотографиям // Проблемы охраны окружающей среды. — Л., 1980.—С. 88—103.
11. Паненко В. В., Брыляков И. А. Аналоговая и цифровая обработка двумерных пространственных спектров морского волнения // Неконтактные методы и средства измерения океанографических параметров: Сб. докл. — М.: Гидрометеиздат, 1986.—С. 96—100.
12. Паненко В. В., Булатова О. В. Многофункциональное сканирующее устройство для оптических измерений с цифровым управлением и отсчетом сигнала // Оптико-мех. пром-сть.—1990.—№ 10.—С. 27—31.
13. Паненко В. В., Булатова О. В., Опришко В. В. Многофункциональное сканирующее устройство для оптических измерений // Оптико-мех. пром-сть.—1986.—№ 4.—С. 30—32.
14. Паненко В. В., Чуклов В. А. Учет случайных параметров в вопросах отображения волн на фотографиях // Неконтактные методы и средства измерения океанографических параметров: Сб. докл. — М.: Гидрометеиздат, 1986.—С. 136—139.
15. Филлипс О. М. Динамика верхнего слоя океана. — Л.: Гидрометеиздат, 1980.—319 с.
16. Kasevich R. S., Jang C. H., Heriksen S. W. Analysis and Optical Processing of Sea Photographs for Energy Spectra // IEEE Trans. Geosci. Electron.—1972.—10, N 1.—P. 51—57.

ON HYBRID ANALOGOUS-DIGITAL METHODS OF TREATMENT OF AEROSPACE IMAGES OF SEA SURFACE

V. V. Panenko

We give a review of fundamental works on the representation of the relief of sea waves on photographic and radar images. We developed some special-purpose instruments for image treatment with the use of optical Fourier transformation, namely, an immersion cell combined with a fourier-lens and an optical analyser with vacillating light guide for decrease of speckle. A scanner for detection of spatial spectra in polar coordinate system is developed and constructed. Digital methods for calculation and correction of parameters of sea waves are applied. Some results of expeditions for the sea surface aerosurvey of the Black Sea and Barents Sea are processed. A space image of the Sea of Okhotsk is analysed.