

Е.В.Чечина, А.Е.Кориненко, Ю.Ю.Юровский, М.В.Юровская

Морской гидрофизический институт, г.Севастополь

**КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ
МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ
МОНИТОРИНГА ОКЕАНА ИЗ КОСМОСА**

Представлен комплекс аппаратуры для решения задач мониторинга геометрии морской поверхности. Он состоит из волнографической системы, лазерного уклонометра, стереофотоаппаратуры, радиолокатора К-диапазона. Дан пример, демонстрирующий возможности данного комплекса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *уклоны волн, спектры волн, лазерный уклонометр, радиолокационная станция.*

В последние годы мониторинг океана из космоса повсеместно используется для различных прикладных задач. Радиолокационные спутниковые системы дают информацию о поле ветра над океаном, об уровне моря, нефтяных загрязнениях, характеристиках поверхностных волн. Они позволяют получать изображения океанской поверхности с разрешением до нескольких метров.

Понимание механизмов формирования морской поверхности необходимо для дистанционного зондирования океана, потому что современные приборы, работающие на спутниках: альтиметр, радиолокатор, радиометр создают изображение, для которых очень важна геометрия морской поверхности. Для совершенствования моделирования и прогноза волнения, изучения волн-убийц необходимо учитывать сильную нелинейность ветровых волн, их обрушения и модуляции, вызванные длинными волнами, приводят к качественно новым и необъясненным эффектам, которые необходимо учитывать для корректной интерпретации спутниковых данных.

Для изучения морской поверхности в лаборатории прикладной физики моря отдела дистанционных методов исследования был создан уникальный комплекс аппаратуры, который позволяет изучать волны различных частот, состоящий из волнографической системы, лазерного уклонометра, стереофотоаппаратуры, радиолокатора К-диапазона.

Состав комплекса. *Метеорологические измерения.* Для анализа данных, получаемых с разных приборов, огромную роль играют локальные метеоданные, которые записывает метеорологический комплекс «Davis» [1]. Измерения скорости и направления ветра выполнялись на высоте 21 м над уровнем моря с центральной мачты над платформой.

Волнографическая решетка. Длинные волны можно измерять с помощью решетки, которая из шести струнных волнографов. Волнографические данные были получены с помощью решетки из шести струнных волнографов [1, 2], которые расположены в центре и вершинах правильного пятиугольника с радиусом описанной окружности 25 см. Решетка подвешивалась на подъемном выстреле так, что расстояние волнографа до бли-

жайшего элемента платформы всегда превышало 10 м. Регулярно проводилась сквозная калибровка всей системы: решетка как целое смещалась на определенное расстояние по вертикали, при этом фиксировались выходные сигналы с каждого датчика. Положение датчиков определялось с точностью до миллиметров с использованием видеокамеры.

Радиолокационная станция (РЛС) К-диапазона (длина волны 8 мм) МГИ представляет собой устройство, которое состоит из идентичных антенн приема и передачи радиосигнала, которые объединены в одном корпусе. Каждая из антенн представляет симметричный конический рупор с диаметром раскрытия 16,5 см. Передатчик излучает сигнал наклонной поляризации. Приемник обеспечен поляризационными фильтрами, которые выделяют из обратного сигнала горизонтально и вертикально поляризованные компоненты [3]. Это дает возможность наблюдать одновременно обратное рассеяние в двух каналах: вертикальном (ВВ) и горизонтальном (ГГ). Каждый из каналов разделен на синфазный и квадратуру, что позволяет, кроме модуля доплеровской скорости, определять ее знак (или направление движения рассеивателя – «от наблюдателя» для отрицательных значений или «к наблюдателю» для положительных).

РЛС может быть установлена на верхней или нижней палубе на альтазимутальной монтировке, что позволяет задавать любые углы падения и азимуты. При такой конфигурации мощности передатчика, которая составляет 100 мВт, хватает для того, чтобы вести уверенный прием сигнала обратного рассеивания от морской поверхности на расстоянии до 20 м. При этом дальняя зона для каждой из антенн начинается с 5 м. Этот интервал и определяет диапазон рабочих углов РЛС от 0 до 70° (угол падения – угол между вертикалью и направлением зондирования). Для маленьких и средних используется верхняя палуба (высота 14 м), для больших – нижняя палуба (высота 6 м).

Лазерный локатор. В основу действия лазерного локатора положен метод излучения морской поверхности световым лучом малого радиуса, с дальнейшим приемом и измерением мощности отраженного излучения. Локатор регистрирует импульсы света, отраженного от участков морской поверхности, которые ориентированы перпендикулярно падающему лучу.

Как источник оптического излучения использовался твердотельный лазер (красного цвета) с диодной накачкой, мощностью до 100 мВт и длиной волны 640 нм. С помощью оптической системы пучок фокусировался на расстоянии 4 м, в параллельный пучок диаметров 4 мм. В качестве приемника использовался фотодиод, установленный в фокусе объектива с фокусным расстоянием 50 мм. Излучение лазера подавалось амплитудной модуляции с частотой 60 кГц с целью надежного выделения полезного сигнала на фоне помех, вызванных солнечными бликами. Принятый фотодетектором отраженный сигнал усиливался предварительным усилителем с передаточной характеристикой, близкой к обратно логарифмической, что позволило избежать его перегрузки сильными сигналами, отраженными плоской поверхностью воды. С выхода предварительного усилителя сигнал поступает на вход основного усилителя, передаточная характеристика, которого тоже обратно логарифмическая. Основной усили-

тель обеспечивает нужное усиление полезного сигнала. Далее для уменьшения помех сигнал поступает на вход синхронного детектора. С целью увеличения скорости приемного шины выходной синхронного детектора поступает на вход устройства выборки-хранения, где происходит запоминание мгновенных значений сигнала.

Волноизмерительная стереосистема, состоящая из двух синхронизированных фотоаппаратов *SONY DSC-R1* с фокусным расстоянием объектива 72 мм и апертурой $17 \times 11^\circ$, жестко устанавливалась на высоте 4,5 м над уровнем моря. Расстояние между камерами составляло 1,5 м, угол наклона оптических осей камер к горизонту – около 30° , что обеспечивало максимальную площадь пересечения изображений на снимках. Пространственное разрешение морской поверхности при таких условиях достигало 1 мм/пиксел при площади обзора примерно 3×4 м.

Для определения точного положения в пространстве и внутренних параметров фотоаппаратов проводилась отдельная процедура калибровки с помощью специального щита в виде шахматного поля. Для обработки таких изображений использовалась стандартная процедура [4]. Импульс к срабатыванию затворов объективов камер подавался вручную каждые 5 – 10 с с помощью специального устройства *LANC Sheperd*, подключаемого к камерами через порт *LANC* и обеспечивающего точность синхронизации снимков, лучше 0,1 мс. Длительность экспозиции составляла 1 – 2 мс, что позволяло регистрировать капиллярные волны с длинами до нескольких миллиметров, движущиеся со скоростью до 1 м/с (эта величина скорости соответствует орбитальным скоростям энергонесущих волн в условиях относительно сильного для Черного моря шторма).

Возможности комплекса. Опишем пример применения комплекса для задач совершенствования радиолокационного мониторинга морской среды. Современная РЛ модель создана для применения в условиях открытого океана с развитым ветровым волнением. Более того, описание РЛ рассеяния для таких условий базируется в значительной степени на феноменологических представлениях о физических процессах на морской поверхности, определяющих интенсивность принимаемого РЛ сигнала. Отметим, что Черное море характеризуется короткими разгонами ветровых волн, поэтому для уменьшения ошибок при восстановлении по спутниковым данным полей ветра и характеристик ветрового волнения требуется соответствующая коррекция РЛ моделей. Качественный анализ радиолокационной информации на Черноморском полигоне в значительной мере затруднен из-за недостаточной изученности механизмов формирования РЛ сигнала. Изучение основных компонент рассеяния волн СВЧ диапазона является сложной и, в целом, нерешенной задачей, как при экспериментальных исследованиях, так и при развитии радиолокационных моделей. Для выполнения таких исследований необходимы совершенно новые методики получения и анализа спектров коротких (сантиметровых) ветровых волн, характеристик зеркальных площадок, параметров обрушений ветровых волн. Проведенные в 2012 – 2013 гг. мониторинговые исследования на Черноморской океанографической платформе были нацелены на решение вышеизложенных проблем. Основная идея этих работ заключалась в выпол-

нении синхронных измерений атмосферных параметров, характеристик геометрии морской поверхности, включая поверхностные волны, характеристик нелинейных процессов на морской поверхности и РЛ наблюдений. С помощью оптической стереосистемы формировались пары фотоснимков морской поверхности, позволяющие восстановить ее мгновенную топографию. Далее по оригинальной методике [4, 5] проводились оценки уровня спектров кривизны коротких ветровых волн $B(\mathbf{k})$ в диапазоне длин волн от дециметров до миллиметров, где $\mathbf{k}$ – волновой вектор поверхностных волн (подробное описание методики см. в [6]). При заданных параметрах РЛ съемки известен волновой вектор резонансной компоненты РЛ рассеяния $\mathbf{k}$, таким образом, $B(\mathbf{k})$ определяет Брэгговскую составляющую сигнала радара [1]. Видеокамерой регистрировались обрушения ветровых волн для определения массива их параметров $\langle q \rangle$ – длина, площадь “барашков”, доля поверхности, покрытой обрушениями. Метеорологические параметры $\langle M \rangle$, включающие скорость и направление ветра, температуру воды и воздуха измерялись метеостанцией, а временная реализация возвышений длинных волн $\xi(t)$, модулирующих РЛ-сигнал, определялись волнографической системой. Выходным сигналом лазерной системы являются радиусы кривизны поверхности, по которым определяется компонента рассеяния, связанная с зеркальными отражениями. Одновременно радиолокатор регистрировал эффективную площадь рассеяния морской поверхности σ .

Все полученные данные синхронно записывались в блок регистрации, созданный на базе персонального компьютера, где производилось определение параметров обрушений ветровых волн (длина, площадь, доля поверхности моря, покрытая обрушениями), вычислялись спектры длинных волн. Таким образом, все перечисленные характеристики определяют компоненты σ и необходимы для анализа РЛ информации и развития моделей рассеяния для последующего использования на Черноморском подспутниковом полигоне.

Заключение. Данный комплекс аппаратуры был уже применен для решения некоторых прикладных задач:

- 1) измерение асимметрии уклонов ветровых волн гравитационного диапазона [7];
- 2) определение спектров коротких ветровых волн [8];
- 3) определение поверхностных пленочных загрязнений [9];
- 4) определение удельной эффективной площади рассеивания.

Авторы выражают благодарность Дулову В.А., Малиновскому В.В., Смолову В.Е. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 14-45-01559 "p_юг_a", № 14-05-01572 "p_юг_a", № 13-05-90429.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чечина Е.В. База волнографических данных, полученных со стационарной океанографической платформы Экспериментального отделения МГИ НАН Украины // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013.– вып.27.– С.215-220.

2. Малиновский В.В., Дулов В.А., Большаков А.Н. и др. Методическое и техническое обеспечение калибровки РЛСБО ИСЗ «СИЧ-1М» для работ над морской поверхностью. Возможный подход // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.– вып.11.– С.236-251.
3. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С.Верба.– М.: Радиотехника, 2010.– 675 с.
4. Kosnik M.V., Dulov V.A. Extraction of short wind wave spectra from stereo images of the sea surface // Measurements Science and Technology.- 2011.- v.22. doi:10.1088/0957-0233/22/1/015504
5. Yurovskaya M.V., Dulov V.A., Chapron B., Kudryavtsev V.N. Directional short wind wave spectra derived from the sea surface photography // J. Geophys. Res.– 2013.– v.118, № 9. doi: 10.1002/jgrc.20296
6. Юровская М.В., Дулов В.А., Шапрон Б., Кудрявцев В.Н. Модель статистических характеристик геометрии морской поверхности для интерпретации спутниковых данных / Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / Под ред. В.А.Иванова, В.А.Дулова.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014.– С.185-208.
7. Сазонов Д.С., Дулов В.А., Садовский И.Н., Чечина Е.В., Кузьмин А.В. Подспутниковые измерения асимметрии уклонов ветровых волн гравитационного диапазона // Украинский метрологический журнал.– 2014.- № 1.– С.54-58.
8. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности.– М.: Наука, 1972.– 424 с.
9. Korinenko A.E., Malinovsky V.V. Field study of film spreading on a sea surface // Oceanologia.– 2014.- № 56 (3).- P.461-475. doi:10.5697/oc.56-3.461

Материал поступил в редакцию 07.11.2014 г.

АНОТАЦІЯ Представлений комплекс апаратури для вирішення завдань моніторингу геометрії морської поверхні. Він складається з волнографічної системи, лазерного ухилометра, стереофотоапаратури, радіолокатора К-діапазону. Дан приклад, що демонструє можливості даного комплексу.

ABSTRACT The complex of equipment to carry out monitoring of sea surface geometry is presented. It consists of wavegraph system, laser inclinometer, stereo- and photo-equipment, K-band radar. The power of this complex is demonstrated as an example.