Исследование параметров морского волнения в рамках международного натурного эксперимента CAPMOS'05: радиополяриметрический метод

И.Н. Садовский, А.В. Кузьмин, М.Н. Поспелов

Институт космических исследований РАН 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32 E-mail: <u>ilya_sadovsky@iki.rssi.ru</u>

В работе представлены результаты восстановления параметров морской поверхности на основе данных, полученных в ходе международного эксперимента CAPMOS'05. Для анализа натурных данных была разработана методика, использующая радиополяриметрические измерения на различных углах зондирования и не требующая каких-либо априорных предположений о форме спектра гравитационно-капиллярных волн (ГКВ). Основой методики является представление морского волнения в виде композиции крупных волн зыби и распределенных по их поверхности более коротких ГКВ. Расчет влияния крупномасштабных и мелкомасштабных (относительно рабочей длины волны радиометра) компонент волнения на регистрируемую радиояркостную температуру осуществляется по методу Кирхгофа и в соответствии с теорией «критических явлений» в приближении метода малых возмущений.

Оригинальная методика обработки данных угловых зависимостей радиояркостных температур позволила получить качественные результаты при решении задачи восстановления параметров спектра водной поверхности. В работе приведена динамика изменения спектра кривизны ГКВ, а также представлена ветровая зависимость дисперсии уклонов крупномасштабных компонент волнения в диапазоне скоростей ветра от 2,0 до 12,0 м/с.

Общая характеристика эксперимента

Проект Combined Active/Passive Microwave Measurements of Wind Waves for Global Ocean Salinity Monitoring (CAPMOS) объединяет 8 научных групп из 4 стран: России, Украины, Италии и Дании. В его рамках в период с 1 по 21 июня 2005 г. на стационарной океанографической платформе ЭО МГИ НАНУ (Экспериментальное отделение Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины), расположенной у южного берега Крыма вблизи пос. Кацивели, проводились комплексные измерения характеристик взаимодействия океана и атмосферы.

Платформа была установлена в 1980 г. для проведения регулярных гидрологических и метеорологических измерений. Географические координаты платформы: 44°23'35" с.ш., 33°59'04" в.д.; удаление от берега около 600 м; глубина моря около 30 м. При господствующих ветрах восточного и западного направления, тем более при южном ветре со стороны открытого моря, обеспечивается достаточный разгон ветровых волн, что позволяет относить волновые измерения к условиям глубокой воды и развитого волнения.

Платформа (рис. 1) имеет несколько рабочих уровней, расположение на них аппаратуры в ходе эксперимента CAPMOS'05 можно схематически обобщить следующим образом:

- глубина 3, 5, 10, 15 и 20 м измерители течений МГИ-1308;
- от поверхности до дна периодические зондирования с помощью СТД-зонда МГИ-4102;
- глубина 1 м термисторный температурный датчик ИКИ;
- глубина 0,3 м СТД-микрозонд МГИ;
- высота 1,5 м метеокомплекс МК-15;

– рабочая палуба на высоте 4 м — 2 антенны струнных волнографов МГИ и ИКИ, акустический анемометр-термометр USA-1, газовый анализатор LI-COR 7500, цифровая фотокамера Olympus 8080 WZ (периодическая фотосъемка), комплекс из 5 радиометров на автоматическом поворотном устройстве;

– основная палуба на высоте 12 м — микроволновый скаттерометр Ки-диапазона, компьютеры управления приборным комплексом и регистрации данных;

– крыша лаборатории на высоте 15 м — цифровая фотокамера Olympus 8080 WZ (периодическая фотосъемка);

- метеомачта на высоте 21 м — метеокомплекс МК-15.

Измерения производились непрерывно 24 часа в сутки, за исключением технологических перерывов на ремонт и обслуживание аппаратуры. Экспериментальные данные регистрировались в цифровой форме на персональных компьютерах.

Описание измерительного комплекса по определению угловых зависимостей радиотеплового излучения

Микроволновые радиометры

Радиометрический комплекс состоял из радиометра теплового инфракрасного диапазона R-IR и набора микроволновых радиометров с рабочими частотами от 3,7 до 94 ГГц (что соответствует длинам волн от 8 см до 3 мм). Основные характеристики радиометров приведены в табл. 1:

ruomidu 1. Ocnobible nupukrepherinki puditokerpob				
Прибор	Диапазон длин волн	Поляризация	Ширина ДН _{3 дБ} ,	Чувствительность, К
			град.	
R-IR	8–12 мкм	-	9	0,1
R03	3 мм	В, Г	7	0,15
R08	8 мм	B, Γ, ±45°	9	0,15
R15	1,5 см	B, Γ, ±45°	9	0,15
R80	8 см	В	15	0,1

Таблица 1. Основные характеристики радиометров

Основные результаты, описанные в настоящей работе, были получены с помощью радиометра-поляриметра диапазона 0,8 см (R08). Ранее этот прибор использовался для измерений с самолетов-лабораторий АН-12 и Ту-134. Радиометр выполнен по супергетеродинной схеме и оснащен вращателем поляризации с использованием эффекта Фарадея. При этом цикл модуляции имеет пять периодов: вертикальная поляризация, горизонтальная поляризация, поляризация +45°, поляризация –45°, согласованная нагрузка. После синхронного детектирования на выходе прибора регистрируются: а) яркостная температура на вертикальной поляризации; б) яркостная температура на горизонтальной поляризации; в) разность радиояркостных температур на поляризациях +45 и -45°. Последняя величина пропорциональна (или равна в зависимости от выбора нормировочного коэффициента) третьему параметру Стокса.

Поворотная/сканирующая платформа

Все радиометры были закреплены на автоматическом поворотном устройстве (рис. 2), обеспечивающем вращение по азимуту в диапазоне углов около 300° и по углу места от надира до зенита. Поворотное устройство было установлено на нижней палубе с мористой (южной) стороны на конце 4-метрового выноса (рис. 1), служащего для уменьшения влияния переотраженного от конструкций теплового радиоизлучения. Данные регистрировались с частотой 3 Гц на персональном

компьютере, с помощью которого также осуществлялось управление поворотным устройством. Программно можно было задать любой алгоритм вращения. Основной алгоритм состоял в сканировании снизу вверх и обратно со скоростью 0,2 об/мин в диапазоне углов от 20 до 153° по отношению к надиру на шести последовательных азимутальных углах, через каждые 36°, и затем возврат на исходный азимутальный угол. Обратный азимутальный скан осуществлялся при фиксированном угле места порядка 65–70° от надира.



Рис. 1. Вид на океанографическую платформу ЭО МГИ НАНУ с восточной стороны

Обработка экспериментальных данных

С целью восстановления параметров спектра ГКВ осуществлялась обработка экспериментальных данных в следующей последовательности:

- На начальном этапе вычислялись значения калибровочных коэффициентов для каждого радиометрического канала по двум эталонным значениям яркостной температуры - черного тела и атмосферы при наблюдении в зенит. Параллельно с этим производился расчет интегрального поглощения атмосферы.
- Далее осуществлялся переход от кодов АЦП к значениям яркостных температур с использованием найденных калибровочных коэффициентов. Пример найденных T_я представлен на рис. 3. На этом же этапе осуществлялась выборка непригодных для последующего анализа данных.
- 3. Усреднение отобранных значений $T_{\mathfrak{A}}$ в пределах одного цикла сканирования осуществлялось по методу наименьших квадратов. Таким образом удалось снизить влияние случайных помех,

а время накопления сигнала на каждом из выбранных вертикальных углов составило, в среднем, около 15 с.



Рис. 2. Поворотная платформа с радиометрическим комплексом. Снизу у основания платформы закреплен поглотитель микроволн («черное тело»)



- 4. Следующим шагом был расчет угловых зависимостей радиояркостных температур для гладкой водной поверхности с учетом переотраженного излучения атмосферы в рамках двухмасштабной модели формирования собственного излучения морской поверхности [2, 6].
- 5. Заключительным этапом подготовки экспериментальных данных был расчет радиояркостных контрастов путем вычисления разницы соответствующих яркостных температур шероховатой и гладкой водной поверхности. Полученные таким образом значения для горизонтальной и вертикальной поляризаций 8-мм радиометра представлены на рис. 4.

Полученные в результате зависимости $\Delta T_{\mathcal{A}_{-} \supset KC\Pi}(\theta)$ использовались в качестве входных данных при решении задачи восстановления параметров спектра ГКВ по методике, подробно описанной в работах [1, 2, 6].



Рис. 5. Восстановленные значения спектра кривизны в сравнении с моделями [3] (A), [4] (E) и [5] (R). Цифрами обозначено расположение в спектре тех значений волновых чисел, для которых на рис. 7 и рис. 8 построены временные зависимости

В качестве примера можно представить результаты восстановления параметров спектра, полученных при анализе угловых зависимостей радиояркостных температур в период с 18:01 по 18:22 8 июня 2005 г. На рис. 5 и 6 приведены восстановленные значения спектра кривизны $B(K) = S(K) \cdot K^3$ и функции дисперсии уклонов морской поверхности $\sigma^2(K) = 2\pi \int_{0}^{K_L} S(K) K^2 dK$ для указанного временного интервала.



Рис. 6. Восстановленные значения зависимости дисперсии уклонов от волнового числа в сравнении с моделями (А), (Е) и (R). Звездочки — значения, измеренные с помощью струнного волнографа. Цифрами обозначено расположение в спектре тех волновых чисел, для которых на рис. 7 и рис. 8 построены временные зависимости

Здесь: S(K) - усредненный по азимуту спектр возвышений морской поверхности; $K = 2\pi/\Lambda$ волновое число поверхностной волны с длиной Λ ; $K_L \approx 0,05 \cdot k$ - волновое число, разделяющее спектр на длинноволновую и коротковолновую области относительно рабочей длины волны используемого радиометра λ ($k = 2\pi/\lambda$).

На том же рисунке представлены расчетные значения спектра кривизны и функции дисперсии уклонов, полученные в соответствии с моделями волнения [3] (А), [4] (Е) и [5] (R) для скорости ветра 4,15 м/с (соответствующей данному временному отрезку).

Подтверждением достоверности полученных результатов являются данные струнного волнографа. Так, на рис. 6 обозначены значения дисперсии уклонов σ_0^2 для всех K < 0,125 и K < 0,066 рад/см (звездочки), полученные из измерений с помощью этого устройства. Ввиду гладкости функции $\sigma^2(K)$ в данном волновом интервале, экстраполирование экспериментальной кривой $\sigma^2(K)$ в область K = 0,066 рад/см наилучшим образом ложится на соответствующие данные волнографа.

Результаты восстановления параметров спектра ГКВ

Для проведения анализа были выбраны результаты экспериментальных исследований, полученных в период с 8:00 8 июня по 12:00 9 июня. Данный временной интервал соответствовал началу систематических измерений в рамках эксперимента CAPMOS'05. К этому моменту были завершены все подготовительные работы по наладке оборудования, юстировке радиометрических приемников, синхронизации измерительного оборудования по времени, калибровке вспомогательных средств измерений.

Значения солености, используемые в расчетах, измерялись СТД-зондом МГИ-4102. Ее вариации в течение всего эксперимента, составили 16,4–18,2 ‰, а в пределах исследуемого временного интервала 16,9–17,4 ‰. Ввиду слабой зависимости яркостного контраста от этого

параметра, во всех представленных ниже результатах значение солености считалось постоянным и равным 17,0 ‰. Измеренные значения температуры водной поверхности лежали в пределах $T_B \in [19,9; 20,8]$ °C и, в отличие от температуры воздуха $T_A \in [17,7; 23,2]$ °C, не имели ярко выраженной зависимости от времени суток.



Рис. 7. Временные зависимости восстановленных значений спектра кривизны B(K), рассчитанных для различных волновых чисел. Цифры соответствуют волновым числам, расположение которых в спектре показано на рис. 5. Сплошная линия – скорость приповерхностного ветра

На рис. 7 и 8 представлены временные зависимости восстановленных значений дисперсий уклонов и спектра кривизны для различных волновых чисел. Из графиков видно, что зависимость σ^2 от скорости ветра становится заметной для K = 5,007 рад/см, и степень этой зависимости увеличивается с ростом K, достигая максимальных значений на верхней границе рассматриваемого диапазона волновых чисел (15,2 рад/см).



Рис. 8. Временные зависимости восстановленных значений функции дисперсии уклонов $\sigma^2(K)$, рассчитанных для различных волновых чисел K_L . Цифры соответствуют волновым числам, расположение которых в спектре показано на рис. 5. Сплошная линия – скорость приповерхностного ветра. Точками обозначены показания струнного волнографа ($K_L = 0,125$ рад/см)

Присутствие ярко выраженного максимума в восстановленном спектре кривизны B(K) объясняет тот факт, что изменение скорости ветра наиболее заметно в поведении B(K) именно в этой области волновых чисел. В представленных данных это значение соответствует $K \approx 7,0$ рад/см. По мере отдаления от этого значения, степень зависимости от скорости ветра снижается, что является ожидаемым ввиду уменьшения абсолютных значений функции B(K). Интересно, что значения функции спектральной плотности на верхней границе рассматриваемого интервала продолжают, хоть и в меньшей степени, следовать ходу изменения скорости ветра, в то время как для нижнего предела эта зависимость практически отсутствует.

Заключение

Результаты анализа полученных в ходе натурного эксперимента данных позволяют сделать следующие заключения:

- 1. Восстановленные значения дисперсии уклонов $\sigma^2(K)$ и спектра кривизны B(K) демонстрирую зависимость от величины скорости приповерхностного ветра.
- 2. Максимум зависимости спектра кривизны ГКВ от скорости приповерхностного ветра наблюдается для области волновых чисел, соответствующей спектральному максимуму *K* ≈ 7,0 рад/см (по данным 8-мм радиометра).
- 3. Чувствительность восстановленных значений дисперсии уклонов поверхностных волн к вариациям скорости ветра начинает проявляться при K_L≈1,5 рад/см (указанное значение волнового числа K соответствует верхнему пределу интегрирования в соотношении для вычисления дисперсии). Максимум корреляции этих величин соответствует верхней границе диапазона рассматриваемых волновых чисел (K ≈ 15 рад/см).
- 4. Представленные результаты свидетельствуют о возможности применения используемого алгоритма обработки данных радиополяриметрических измерений для восстановления параметров спектра ГКВ. Данные, полученные в результате систематических измерений уходящего излучения водной поверхности, могут быть использованы для построения ветровых зависимостей, уточнения существующих или создания новых моделей волнения, а также для объяснения физических процессов на границе раздела океан – атмосфера.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 05-05-64451-а и INTAS 03-51-4789.

Литература

- 1. Садовский И.Н. Алгоритм восстановления параметров спектра гравитационно-капиллярных волн на основе данных угловых радиополяриметрических измерений // 7-ая Международная научно-технич. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии»: Сб. докл. Владимир, 2006. С. 79–82.
- 2. *Трохимовский Ю.Г.* Модель радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности // Исследование Земли из космоса. 1997. № 1. С. 39–49.
- Apel J.R. An improved ocean surface wave vector spectrum // J. Geophysical Research. 1994. V. 99. P. 16269–16291.
- 4. *Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D.* A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. P. 15781–15796.
- 5. *Romeiser R., Alpers W., Wismann V.* An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface. 1. Theory of the model and optimization/validation by scatterometer data // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. P. 25237–25250.
- 6. *Trokhimovskii Yu.G., Irisov V.G., Westwater E.R., Fedor L.S., Leuski V.E.* Microwave polarimetric measurements of the sea surface brightness temperature from a blimp during the Coastal Ocean Probing Experiment (COPE) // J. of Geophysical Research. 2000. V. 105. N° C3. P. 6501–6516.