

Исследование параметров морского волнения в рамках международного натурального эксперимента CAPMOS'05: контактные измерения с использованием пятиструнного волнографа

В.С. Антонов, И.Н. Садовский

*Институт космических исследований РАН
117997 Москва, Профсоюзная, 84/32
E-mail: antonov_vitalij@mail.ru*

Короткие гравитационно-капиллярные и капиллярные волны на водной поверхности оказывают значительное влияние на процессы излучения и отражения электромагнитных волн. Именно поэтому проблема установления количественных отношений между параметрами коротких поверхностных волн и излученных / рассеянных электромагнитных волн имеет большое значение при решении задач дистанционного зондирования океана. В рамках международного эксперимента CAPMOS'05 проводились дистанционные исследования морской поверхности с использованием комплекса радиометров с рабочими длинами волн 3, 8, 15 и 80 мм, сопровождаемые контактными измерениями с помощью пятиструнного волнографа. Подобное сочетание позволило получать информацию о пространственно-временной структуре волнения с целью последующего анализа и разработки алгоритма восстановления параметров спектра морского волнения в гравитационно-капиллярном интервале на основе данных угловых радиополяриметрических исследований. В работе приведена структурная схема электронной части пятиструнного волнографа, а также представлен алгоритм обработки полученных с его помощью данных. Полученные результаты могут использоваться для интерпретации данных дистанционного зондирования, способствовать уточнению существующих и разработке новых моделей волнения на поверхности Мирового океана.

Введение

Исследования океана и атмосферы над океаном с помощью микроволновых систем космического зондирования имеют неоспоримое преимущество перед традиционными контактными и оптическими методами, поскольку предоставляют возможность получать информацию с обширных территорий, независимо от освещенности и облачного покрытия. При помощи этих измерений резко возрастает количество информации о состоянии и взаимодействии природных сред, особенно атмосферы и океана.

В последнее время, методы дистанционного зондирования морской поверхности широко развиваются во всем мире и используются для изучения различных процессов, происходящих в океане, а также явлений, воздействующих на его поверхность: внутренних гравитационных волн в океане и в атмосфере, поверхностного волнения и солености, гидрологических фронтов, течений, природных и антропогенных загрязнений, корабельных следов, областей развития атмосферной конвекции, ледового покрытия, рельефа дна и др.

Более эффективное использование данных возможно на основе физических моделей, количественно связывающих вариации интенсивности микроволнового сигнала с параметрами физических процессов на поверхности океана. Ныне существующие модели, как правило, не приспособлены для широкого применения и требуют значительных затрат на адаптацию к каждому конкретному случаю. Это обуславливает использование контактных или оптических методов для правильной интерпретации и валидации данных дистанционного зондирования.

Одной из проблем является отсутствие качественной информации о структуре волн в ходе проведения исследований. Опыт, полученный сотрудниками ИКИ РАН в ходе

экспедиций серии «Геленджик» (1999-2004), показал, что использование в этих целях однострунной схемы измерителя волнения, которая относится к контактному методу измерения, не позволяет восстанавливать пространственную структуру волнового поля. Для точного определения параметров поверхностного волнения необходимо использовать многострунный измеритель уровня, с определенной расстановкой датчиков в пространстве.

Функциональная схема

Функциональная схема пятиструнного волнографа представлена на рис. 1. Шесть измерительных каналов, изображенных на схеме, соответствуют 5 рабочим каналам, используемых для подключения измерительных струн, и 1 тестовому для подключения опорного сопротивления.

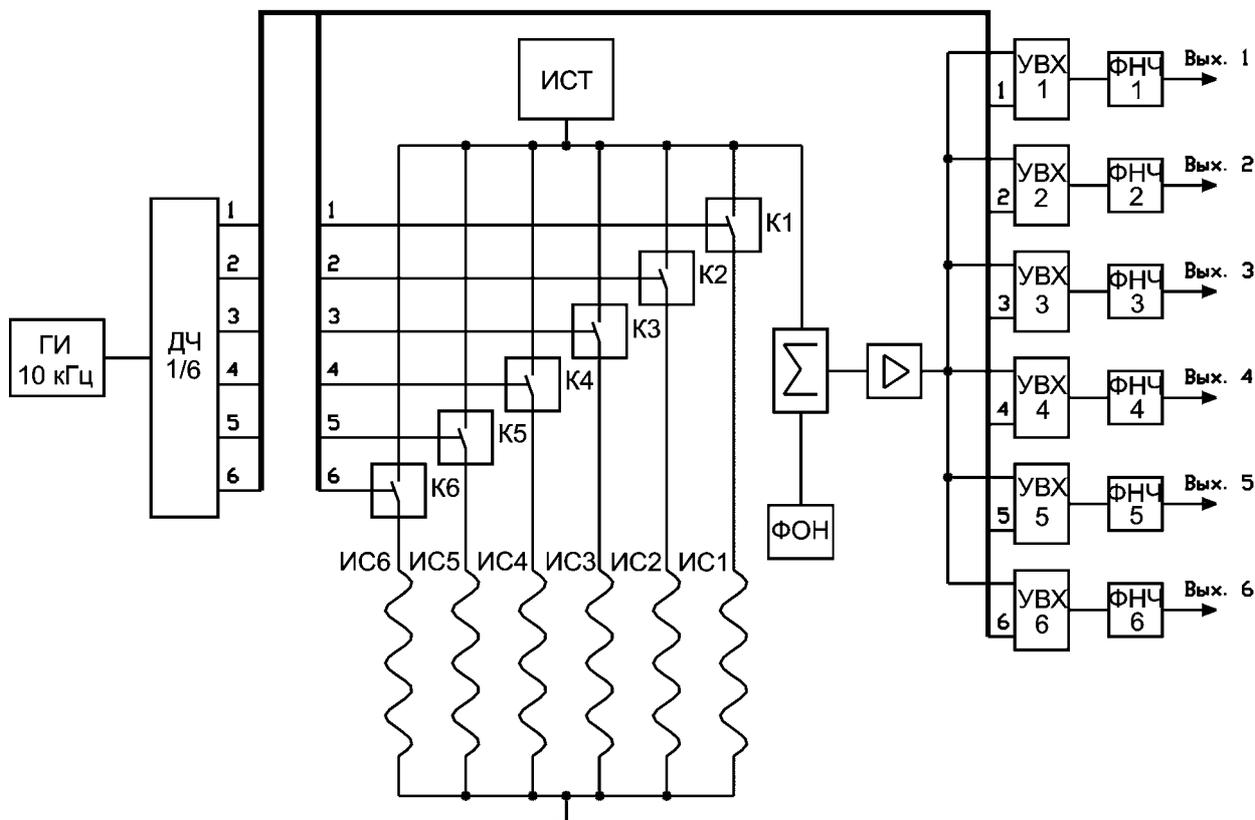


Рис. 1. Функциональная схема пятиструнного волнографа

Управляющая часть прибора состоит из генератора импульсов (ГИ), делителя частоты (ДЧ 1/6) и коммутационных аналоговых ключей (K1-K6). Генератор импульсов вырабатывает импульсы с частотой следования 10 КГц. Частота выбрана как компромисс для обеспечения необходимой точности измерения и допустимых скоростей работы устройств выборки-хранения и других аналоговых узлов. Импульсы с генератора поступают на делитель частоты 1/6, который по приходу каждого импульса выдает напряжение на одном из своих выходов (1-6), сначала на первом, потом на втором и т.д. Эти напряжения управляют коммутационными аналоговыми ключами и устройствами выборки-хранения (УВХ1-УВХ6). С помощью коммутационных аналоговых ключей к соответствующим измерительным струнам (ИС1-ИС6) подключается источник стабильного тока (ИСТ).

В зависимости от уровня погружения струн в воду, вследствие изменения их сопротивления, напряжения на струнах меняются пропорционально волнениям воды. Эти напряжения поступают на сумматор напряжения. Так же на сумматор поступает сигнал

устройства формирования опорного нуля (ФОН), служащего для установки середины динамического диапазона измерения. На выходе сумматора формируется общий информационный сигнал (ОИС). Следующий за сумматором усилитель усиливает поступающий на него общий информационный сигнал по амплитуде и подает на аналоговые входы устройств выборки-хранения. Устройства выборки-хранения формируют из общего информационного сигнала посредством синхронизации с выходными сигналами делителя частоты шесть индивидуальных информационных сигналов.

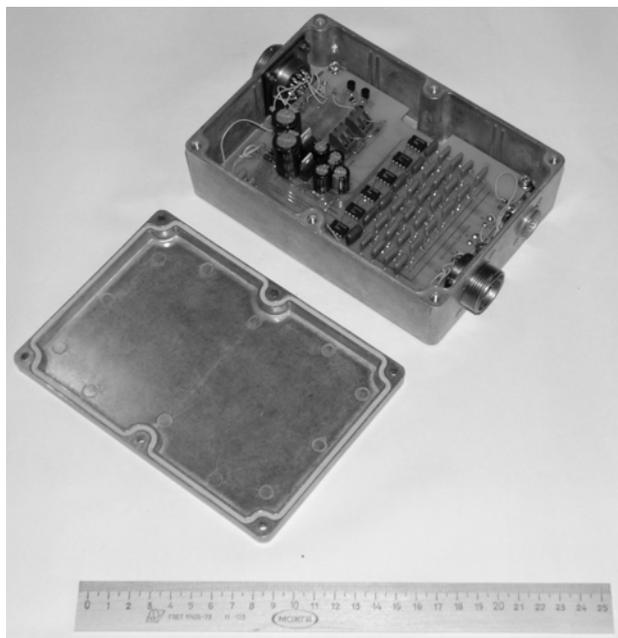


Рис. 2. Блок управления пятиструнного волнографа



Рис. 3. Система измерительных струн

В результате работы схемы сначала производится опрос первой струны и одновременное запоминание напряжения на соответствующем устройстве выборки-хранения, затем производится опрос второй струны и т.д. в циклическом порядке. Индивидуальные информационные сигналы поступают на фильтры низких частот для очистки выходного сигнала от шумов работы схемы и от возможных паразитных наводок 50 гц. На выходах фильтров низких частот вырабатываются напряжения, пропорциональные вариациям уровня воды вокруг соответствующих измерительных струн.

Технические характеристики

Измеритель волнения морской поверхности является законченным устройством и состоит из блока управления (рис. 2), системы измерительных струн (рис. 3), сетевого источника питания и комплекта соединительных кабелей. Измерительные струны изготовлены из нихрома диаметром 0,25 мм и имеют длину порядка 4 метров. Струны фиксируются параллельно друг другу с помощью стальной конструкции, состоящей из двух (над- и подводного) треугольников, жестко соединенных между собой несущей трубой (рис. 3).

Пятиструнный волнограф предназначен для эксплуатации по группе № 2 ГОСТ16019-86 и является стационарным, устанавливаемым на открытом воздухе прибором. Повышенная влажность - опасный параметр, действие которого может губительно сказываться на электронном оборудовании, вследствие чего блок управления волнографа имеет герметичный металлический корпус.

Таблица 1. Технические характеристики пятиструнного волнографа

Параметр	Значение
Напряжение питания, В	$\pm 15\text{В} \pm 15\%$
Количество измерительных каналов	6 (5 + 1 запасной)
Сопротивление струн (соответствующее длине четыре метра), Ом	60
Ток измерения, мА не более	1
Коэффициент усиления по напряжению	250
Диапазон выходных напряжений, В не более	± 10
Потенциал нижней части струн	потенциал земли
Переходное затухание между каналами, дБ не менее	50
Частота среза выходных ФНЧ, Гц	10
Спад выходных ФНЧ после частоты среза, дБ/октава не менее	20

Измерение пространственно-временной структуры волнения

Для проведения измерений система струн (рис. 3) погружается в морскую воду на глубину, примерно равную половине длины струн (около 2 м). Измерение волнения морской поверхности осуществляется посредством записи выходных сигналов блока управления волнографа на персональном компьютере через плату сопряжения аналого-цифрового преобразователя. Результатом является получение временных зависимостей относительных высот поверхностных волн, измеренных каждым из пяти каналов (струн). Дальнейшая калибровка полученных результатов осуществляется в приближении линейной зависимости значений выходных напряжений блока управления от глубины погружения струн (рис. 4). Определение соответствующих каждой из пяти струн значений калибровочных коэффициентов позволяет осуществить переход к абсолютным значениям регистрируемых высот в метрах (рис. 5).

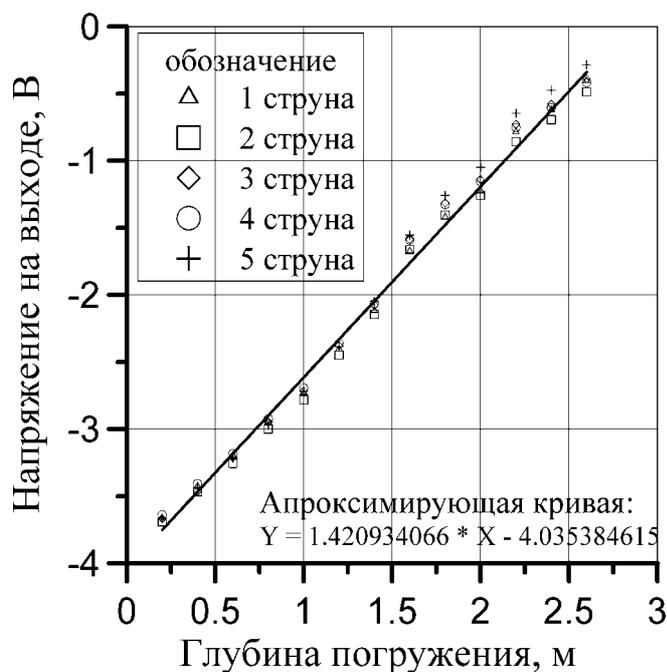


Рис. 4. Зависимость напряжения на выходе блока управления волнографа

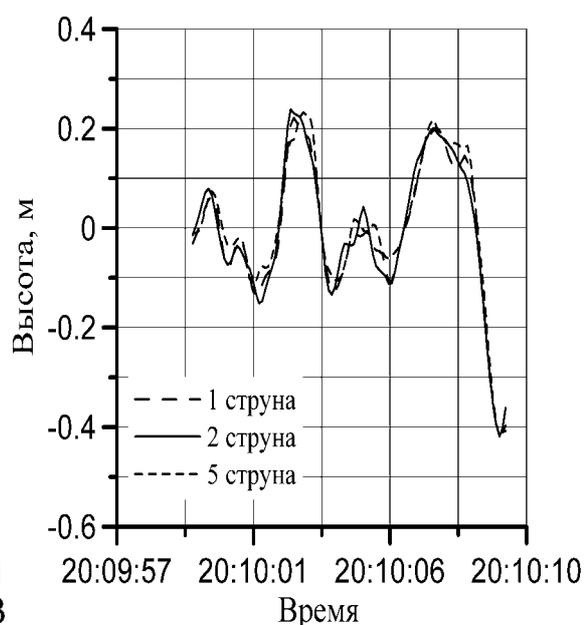


Рис. 5. Пример записи волнения морской поверхности от глубины погружения струн

Полученные данные могут быть использованы для определения ненаправленного спектра возвышений с помощью быстрого преобразования Фурье (рис. 6), а также для вычисления мгновенных значений уклонов морской поверхности и их дисперсии.

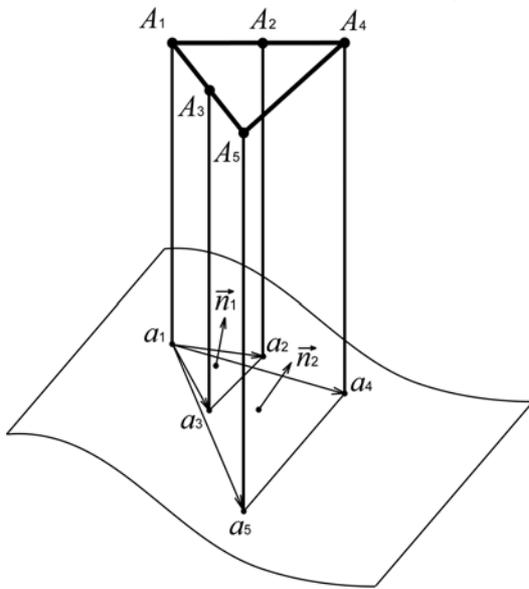


Рис. 6. Ненаправленный спектр возвышений

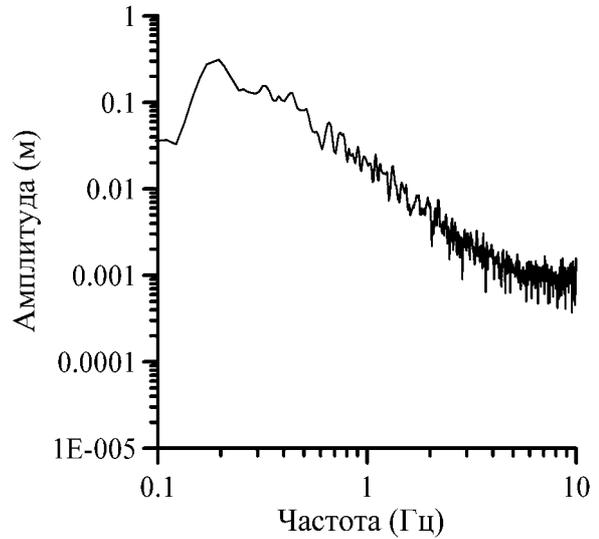


Рис. 7. Схема расположения струн, использовавшаяся при измерении пространственно-временной структуры волнения

На рис. 7 представлена система расположения струн, использованная в эксперименте CAPMOS'05. Подобная схема позволяет определять мгновенные значения уклонов площадок [1], образованных векторами $\overline{a_1 a_i}$, $i = 2-5$, а также площадок несимметричного размера, образованных, например, векторами $\overline{a_2 a_5}$ и $\overline{a_2 a_4}$. При этом длина поверхностных волн, для которых могут быть рассчитаны значения уклонов, меняется в зависимости от взаимной ориентации системы струн и направления распространения волн.

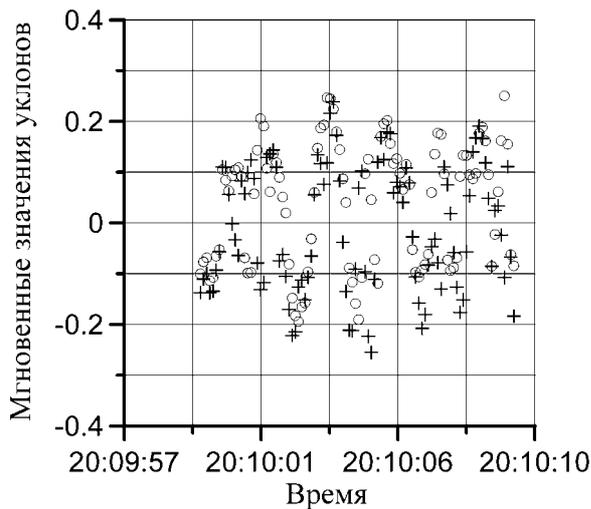


Рис. 8. Пример записи мгновенных значений уклонов площадок, соответствующих векторам $\overline{n_1}$ (крестики) и $\overline{n_2}$ (кружочки)

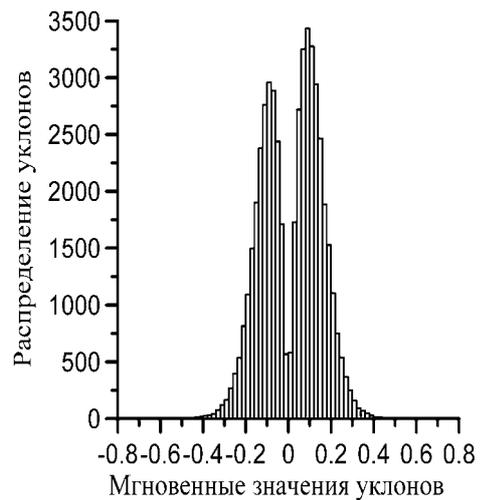


Рис. 9. Гистограмма распределения мгновенных значений уклонов. Положительные значения по горизонтальной оси соответствуют наблюдению против ветра.

Порядок определения мгновенных значений уклонов выделенных площадок:

1. Определение координат точек a_i , $i = 1-5$. Эта операция подобна определению координат векторов $\overline{a_1 a_i}$ в пространстве.
2. Расчет координат векторов нормали к выделенным площадкам $\overline{n_1}$ и $\overline{n_2}$, путем векторного перемножения образующих эту площадку векторов: $\overline{n_1} = \overline{a_1 a_3} \times \overline{a_1 a_2}$ и $\overline{n_2} = \overline{a_1 a_4} \times \overline{a_1 a_5}$.
3. Знание координат векторов нормали определяет уклон площадки относительно вертикальной оси и знак этого уклона при выборе соответствующей плоскости. Абсолютное значение уклона вычисляется по формуле: $\eta = \left| \overline{n_{XY}} \right| / n_Z$, где $\left| \overline{n_{XY}} \right|$ — модуль проекции вектора на плоскость $\overline{n_i}$ XOY и n_Z — проекция вектора $\overline{n_i}$ на ось OZ.

На рис. 8 представлена временная зависимость рассчитанных значений уклонов поверхности с учетом знака. В данной ситуации плоскость, относительно которой определялся знак уклонов, проходила через вертикальную ось и вектор $\overline{a_3 a_2}$. На рис. 9 построена гистограмма распределения мгновенных значений уклонов для площадки $a_3 a_1 a_4$, полученная на основе анализа 20-и минутной реализации волнения

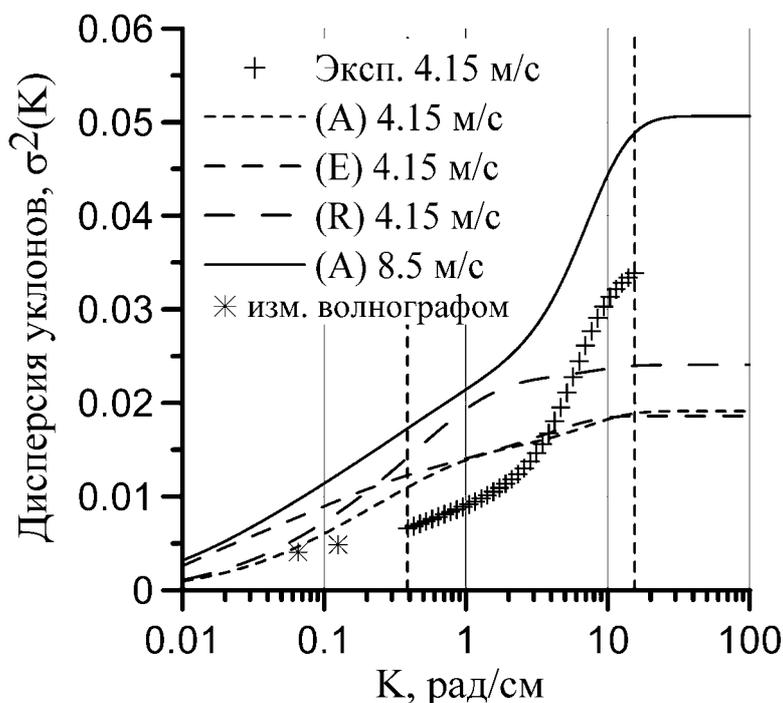


Рис. 10. Результаты сравнения восстановленной функции дисперсии уклонов (радиополяриметрический метод) (крестики), данных струнного волнографа (звездочки) и модельных расчетов (модели (A) [5], (E) [6] и (R) [7])

Данные измерений, полученные с помощью пятиструнного волнографа, сравнивались с результатами радиополяриметрического метода восстановления параметров спектра [2, 3, 4], а также с модельными расчетами, выполненными в соответствии с моделями ветрового волнения (A) [5], (E) [6] и (R) [7]. Как видно из представленных на рис. 10 зависимостей, экстраполяция восстановленных радиополяриметрическим методом значений дисперсии уклонов волновой поверхности в область волновых чисел 0,125 рад/см наилучшим образом ложится на данные пятиструнного волнографа. Отличие от соответствующих результатов модельных расчетов свидетельствует о необходимости уточнения существующих моделей ветрового волнения с целью более корректного учета пространственно неоднородного характера ветрового потока.

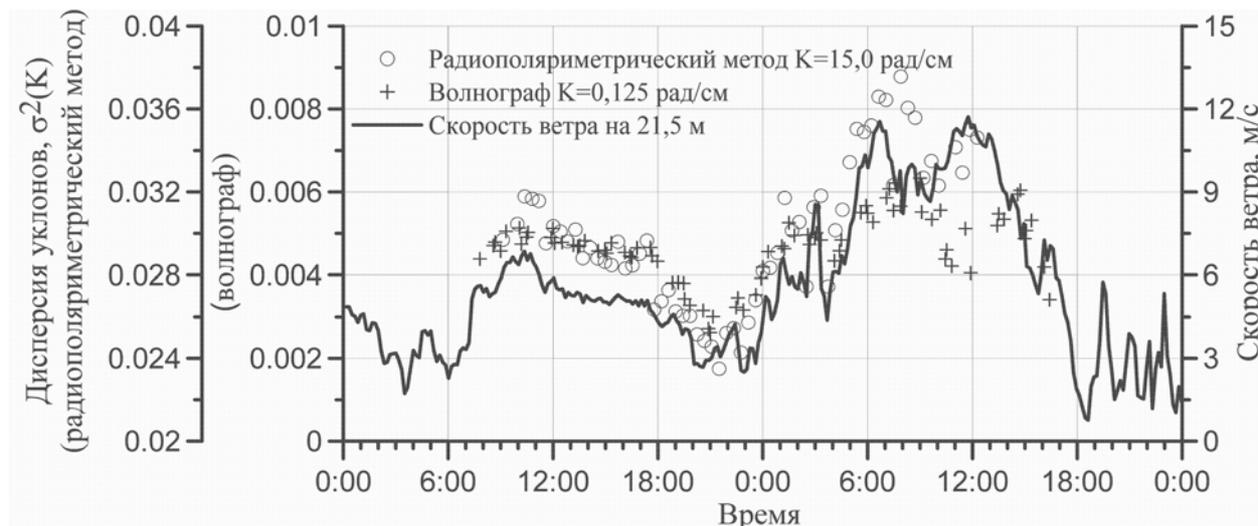


Рис. 11. Ветровые зависимости дисперсии уклонов морской поверхности, измеренные струнным волнографом (крестики) и восстановленные радиополяриметрическим методом (кружочки)

На рис. 11 представлены ветровые зависимости для дисперсий уклонов, измеренных посредством пятиструнного волнографа ($K \approx 0,125$ рад/см) и восстановленных на основе анализа данных радиополяриметрических измерений ($K \approx 15,0$ рад/см). Как видно из графика, данные как контактных, так и дистанционных измерений демонстрируют непосредственную связь со скоростью ветра и лишь на некоторых участках (с высокими значениями скорости ветра) отличаются от хода кривой скорости ветра.

Заключение

Полученные в ходе международного натурального эксперимента CAPMOS'05 результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанное устройство пятиструнного волнографа позволяет восстанавливать пространственно-временную структуру ветрового волнения.
2. При определении ненаправленного спектра возвышений морской поверхности диапазон волновых чисел ограничен сверху, с одной стороны, схмотехническим решением, использованном при конструировании блока управления волнографа, с другой, присутствием капиллярных эффектов за счет конечного диаметра измерительных струн.
3. Область волновых чисел, для которых возможно измерение дисперсии уклонов морской поверхности, определяется геометрией расположения измерительных струн как относительно друг друга (расстояние между струнами), так и относительно направления распространения волнения.
4. Представленные зависимости измеренных параметров волнения от скорости ветра позволяют использовать результаты измерений струнного волнографа для валидации данных дистанционных методов восстановления параметров спектра гравитационно-капиллярных волн, а также уточнения существующих моделей ветрового волнения.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия отечественной науке, гранта РФФИ 05-05-64451 и гранта INTAS 03-51-4789.

Литература

1. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 256 с.
2. Kuzmin A.V., Pospelov M.N. Retrieval of Gravity-Capillary Spectrum Parameters by Means of Microwave Radiometric Techniques // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, No. 5, 983-989, 2005.
3. Садовский И.Н. Алгоритм восстановления параметров спектра гравитационно-капиллярных волн на основе данных угловых радиополяриметрических измерений // 7-я Международная научно-технич. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии»: Сб. докл. Владимир, 2006. С. 79–82.
4. Садовский И.Н. Поляризационные радиотепловые методы в исследованиях параметров морского волнения: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИКИ РАН, 2007. 184 с.
5. Apel J.R. An improved ocean surface wave vector spectrum // J. Geophysical Research. 1994. V. 99. P. 16 269–16 291.
6. 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. 15 781–15 796.
7. 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. 25 237–25 250.