

Д. С. Сазонов, А. В. Кузьмин, И. Н. Садовский

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЗИМУТАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ
СОБСТВЕННОГО РАДИОТЕПЛОвого ИЗЛУЧЕНИЯ
ВЗВОЛНОВАННОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ SARMOС**

Представлено к печати
зам. директора ИКИ РАН
Р. Р. Назировым

**МОСКВА
2013**

Исследование азимутальной анизотропии собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в экспериментах CAPMOS

Д. С. Сазонов, А. В. Кузьмин, И. Н. Садовский

Представлены результаты исследования азимутальных вариаций собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности на частоте 37 ГГц. В ходе работы проведена калибровка и обработаны данные экспериментов CAPMOS, полученные на вертикальной, горизонтальной поляризациях и на «разностном» линейном канале 8-мм радиометра. Азимутальные записи радиояркостного контраста взволнованной водной поверхности были аппроксимированы квазигармоническими функциями для определения коэффициентов азимутальной анизотропии собственного радиотеплового излучения. Проведено сравнение коэффициентов азимутальной анизотропии с теоретической моделью, данными самолётных и спутниковых измерений и отмечено хорошее совпадение между ними.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-05-00493-а) и гранта Президента РФ № МК-865.2012.5.

The Study of the Relative Wind Direction Dependence of the Wind-Induced Ocean Surface Emissivity Using CAPMOS Experimental Data

D. S. Sazonov, A. V. Kuzmin, I. N. Sadovsky

The study of the dependence of the wind-induced ocean surface emissivity on relative wind direction at 37 GHz is present. Data received from CAPMOS experiments at vertical, horizontal polarizations and ‘difference’ radiometer channels calibrated and analyzed. The azimuthal recordings of wind-induced ocean surface emissivity were been approximated by harmonic (Fourier) functions. It was make to determine the harmonic coefficients. The comparison between harmonic coefficients of your results, theoretical model, airborne and satellite data showed their good agreement.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большой вклад в исследование Мирового океана вносят системы дистанционного зондирования. По данным дистанционного зондирования можно определять следующие параметры: гидрометеорологические, т.е. скорость и направление ветра, параметры облачного покрова, интенсивность осадков над океаном, и другие характеристики, а также производить картирование ледовой области. Далее эти параметры используются для краткосрочного и долгосрочного прогнозирования погоды, предупреждения стихийных бедствий, экологических, климатологических и океанологических исследований.

Наблюдение Мирового океана проводятся в оптическом, инфракрасном и микроволновом радиодиапазонах. В микроволновом диапазоне выделяют два основных метода дистанционного зондирования: активные и пассивные. Микроволновая радиометрия — один из пассивных методов дистанционного зондирования, который основан на измерении собственного электромагнитного излучения поверхности океана в диапазоне миллиметровых, сантиметровых и дециметровых волн.

Основными преимуществами микроволновой радиометрии являются: возможность проводить круглосуточные измерения; относительно низкое поглощение электромагнитного излучения в атмосфере и атмосферных образованиях и высокая информативность принимаемого радиотеплового излучения водной поверхности. Последнее связано с физико-химическими, диэлектрическими свойствами воды, но большое влияние на радиояркостную температуру в миллиметровом и сантиметровом диапазонах электромагнитного излучения оказывает интенсивность волнения, которая в свою очередь зависит от скорости приповерхностного ветра.

В основном выделяют три типа неровностей взволнованной водной поверхности, которые влияют на интенсивность её излучения: гравитационные волны, чья длина много больше длины волны принимаемого электромагнитного излучения; гравитационно-капиллярные волны, длина которых соизмерима с длиной волны принимаемого электромагнитного излучения; пена, возникающая на взволнованной водной поверхности при скоростях ветра начиная с 5...7 м/с.

Собственное радиотепловое излучение взволнованной водной поверхности, вызванное перечисленными типами неровностей, в значительной степени изотропно. Несмотря на это существует небольшая добавка в виде анизотропного излучения (эффект азимутальной анизотропии), которая зависит как от скорости ветра, так и от угла между направлением ветра и направлением зондирования.

Впервые эффект азимутальной анизотропии был обнаружен в 70-х гг. прошлого века в ходе проводившихся в Институте космических исследований АН СССР [Беспалова и др., 1979] экспериментов по радиотепловому зондированию морской поверхности с борта самолёта-лаборатории, при помощи размещённых на нём различных радиометрических систем с антеннами, установленными в наدير [Беспалова и др., 1982]. При зондировании в наدير азимутальная анизотропия превращается в поляризационную, то есть радиояркостная температура максимальна, когда плоскость поляризации принимаемого излучения параллельна направлению ветра, и минимальна, когда они ортогональны.

Данные эксперименты впервые продемонстрировали важность проведения измерений в полном поляризационном базисе. В результате исследований были обнаружены вариации радиояркостной температуры и сечения обратного рассеяния при выполнении виражей и установлено, что наблюдаемое явление поляризационной анизотропии представляет собой поверхностный эффект и не имеет отношения к вариациям радиоизлучения, обусловленным подсветом Солнца и облачностью. Важным наблюдением стало то, что в условиях отсутствия ветра и наличия зыби эффект поляризационной анизотропии отсутствует. Этот факт говорит о том, что данный эффект связан с гравитационно-капиллярными ветровыми волнами. Кроме того, было установлено, что величина поляризационной анизотропии увеличивается с увеличением скорости ветра и уменьшается с увеличением длины волны принимаемого излучения. Таким образом, обнаруженный эффект можно исполь-

зовать для дистанционного измерения скорости и направления приповерхностного ветра.

В 80-е гг. прошлого века исследователями из Института космических исследований [Беспалова и др., 1982] были построены зависимости величины поляризационной анизотропии от скорости ветра. Под величиной поляризационной анизотропии понимается разность большой и малой оси поляризационного эллипса при зондировании в надир, что равнозначно амплитуде второй гармоники азимутальных вариаций второго (S_2) и третьего (S_3) параметров Стокса [Поспелов, 2004]. Для скоростей ветра до 12 м/с построенные зависимости были аппроксимированы степенной функцией с показателем степени 1,5–2.

Кроме измерений азимутальной анизотропии, выполненных в надир, были также проведены исследования и на настильных углах наблюдения [Гречко и др., 1991]. В результате данных исследований было установлено, что, во-первых, величина анизотропии для настильных углов наблюдения больше, чем для надирных, и, во-вторых, яркостная температура меньше при наблюдении в направлении «по» приповерхностному ветру или «против» него, чем в случае «перпендикулярного» направления ветра. Проведённые модельные расчёты показали хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными данными и что именно гравитационно-капиллярные волны участвуют в формировании анизотропии, как на настильных, так и на надирных углах наблюдения.

После обнаружения эффекта азимутальной анизотропии во всём мире начали проводиться активные исследования поляризационных характеристик собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности. Было проведено немалое количество лабораторных и натуральных радиополяриметрических экспериментов по его изучению, а также построены некоторые модели [Беспалова и др., 1979; Гречко и др., 1991; Germain et al., 2002; Yueh et al., 1995; Wentz, 1992]. А в январе 2003 г. был запущен первый радиополяриметр WindSat на спутнике Coriolis — первый спутниковый радиометр, работающий в полном поляризационном базисе.

Цель настоящей работы — исследование влияния скорости и направления приповерхностного ветра на интенсивность анизотропного излучения взволнованной морской поверхности. Для проведения исследований были выбраны данные натуральных измерений радиояркостной температуры водной поверхности, полученные с помощью микроволнового радиополяриметра 8-мм диапазона.

АЗИМУТАЛЬНАЯ АНИЗОТРОПИЯ СОБСТВЕННОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЗВОЛНОВАННОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Полная радиояркостная температура взволнованной водной поверхности при наблюдениях вблизи поверхности определяется следующим уравнением [Башаринов и др., 1974]:

$$T_{\text{я}} = ET_0 + |R|^2 T_{\text{яА}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{я}}$ — наблюдаемая радиояркостная температура воды; E — коэффициент теплового излучения; T_0 — физическая температура воды; R — коэффициент отражения от плоской поверхности; $T_{\text{яА}}$ — радиояркостная температура атмосферы, которая зависит от угла наблюдения (в приближении плоской атмосферы) следующим образом [Башаринов и др., 1974]:

$$T_{\text{яА}}(\theta) = \left(T_{\text{А}}^{\text{физ}} - 10 \text{ К} \right) \left(1 - e^{-\tau/\cos\theta} \right), \quad (2)$$

где τ — величина интегрального поглощения атмосферы; $T_{\text{А}}^{\text{физ}}$ — физическая температура воздуха.

В работе [Meissner, Wentz, 2012] предложено рассматривать общий коэффициент теплового излучения E как сумму трёх компонент:

$$E = E_0 + \Delta E_W + \Delta E_{\varphi}, \quad (3)$$

где ΔE_W — изотропное приращение излучения в зависимости от скорости ветра; ΔE_{φ} — анизотропное приращения излучения в зависимости от скорости ветра и азимутального угла наблюдения; E_0 — коэффициент теплового излучения гладкой водной поверхности, который даёт большую часть излучения и связан с коэффициентом отражения соотношением: $E + |R|^2 = 1$. Коэффициент отражения R определяется по известным формулам Френеля для вертикальной (R_V) и горизонтальной (R_H) поляризаций [Башаринов и др., 1974]:

$$\left. \begin{aligned} |R_V(\theta)|^2 &= \left| \frac{\varepsilon \cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}} \right|^2, \\ |R_H(\theta)|^2 &= \left| \frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}} \right|^2, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где ε — комплексная диэлектрическая проницаемость; θ — угол, характеризующий направление излучения в вертикальной плоскости. Расчёт коэффициентов приращения излучения ΔE_W и ΔE_Φ приведён в Приложении.

При наличии экспериментальных данных о температуре воды и воздуха, поглощении атмосферы радиояркостную температуру водной поверхности можно определить как разность измеренной температуры и подсвета атмосферы:

$$ET_0 = T_{\text{я}}^{\text{экс}} - |R|^2 T_{\text{яА}}, \quad (5)$$

а приращение радиояркостной температуры (радиояркостный контраст) — как разность радиояркостной температуры взволнованной и гладкой водной поверхности:

$$\Delta T_{\text{я}} = ET_0 - E_0 T_0 = (\Delta E_W + \Delta E_\Phi) T_0. \quad (6)$$

Как видно из представленного соотношения, радиояркостный контраст состоит из двух слагаемых: $\Delta E_W \cdot T_0$ которое зависит только от скорости ветра, и $\Delta E_\Phi \cdot T_0$, зависящее как от скорости ветра, так и от угла между направлением ветра и направлением визирования.

В работах [Гречко и др., 1991; Поспелов, 2004; Meissner, Wentz, 2012] азимутальную анизотропию определяют квазигармонической функцией, чётной для вертикальной (v) и горизонтальной (h) поляризации и нечётной для третьего ($S3$) и четвёртого ($S4$) параметров Стокса [Meissner, Wentz, 2012].

$$\Delta E_\Phi \cdot T_0 = \begin{cases} a_1 \cos(\varphi) + a_2 \cos(2\varphi), & V, H, \\ a_1 \sin(\varphi) + a_2 \sin(2\varphi), & S3, S4, \end{cases} \quad (7)$$

где a_1 и a_2 — первый и второй гармонические коэффициенты квазигармонической функции; φ — угол, между направлением ветра и направлением визирования. Радиояркостный контраст для вертикальной и горизонтальной поляризации можно записать в виде [Гречко и др., 1991]:

$$\Delta T_{\text{я}} = a_0 + a_1 \cos(\varphi) + a_2 \cos(2\varphi), \quad (8)$$

где a_0 — постоянный уровень; a_1 — половина разности радиояркостной температуры в направлении «по» ветру и «против» него; a_2 — половина коэффициент анизотропии.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ В РАМКАХ ПРОЕКТА CARPOS
(COMBINED ACTIVE/PASSIVE MICROWAVE MEASUREMENTS
OF WIND WAVES FOR GLOBAL OCEAN SALINITY MONITORING)**

Начиная с 2005 г. на океанографической платформе ЭО МГИ НАНУ (Экспериментальное отделение Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины) проводятся исследования взаимодействия океана и атмосферы с помощью микроволновых радиометрических измерений. Платформа расположена на южной оконечности полуострова Крым близ п. Кацивели, Украина (географические координаты: $44^{\circ} 23' 35''$ с. ш., $33^{\circ} 59' 04''$ в. д.) и находится на удалении 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. Более подробную информацию об океанографической платформе и проводимых на ней экспериментах можно узнать в работе [Кузьмин и др., 2009]. Экспериментальные исследования на океанографической платформе проводились в 2005, 2007, 2009 и 2012 гг.

Сканирование водной поверхности осуществлялось с помощью радиометрических приёмников, закреплённых на специальной поворотной платформе «Траверс», разработанной в ИКИ РАН. Поворотно-сканирующая платформа (рис. 1), размещалась на конце выноса высотой 4 м над уровнем моря. Сканирование осуществлялось в вертикальном направлении от 20 до 151° и в горизонтальном направлении — от 73 до 251° . Управление поворотной-сканирующей платформой и регистрация данных производились с помощью персональных компьютеров.

Радиояркостьная температура измерялась на вертикальной и горизонтальной поляризациях, а также регистрировались значения разности линейных поляризаций $\pm 45^{\circ}$. Излучение в радиометре разделялось с помощью фазовращателя Фарадея. Дополнительно регистрировались показания автономных метеокомплексов МК-14 и МК-15. Температура воды и воздуха измерялась термодатчиками, установленными на глубине 1 м и высоте 4 м соответственно. Также производилась периодическая фотосъёмка состояния поверхности моря и атмосферы с помощью веб-камеры, установленной на поворотной-сканирующей платформе.

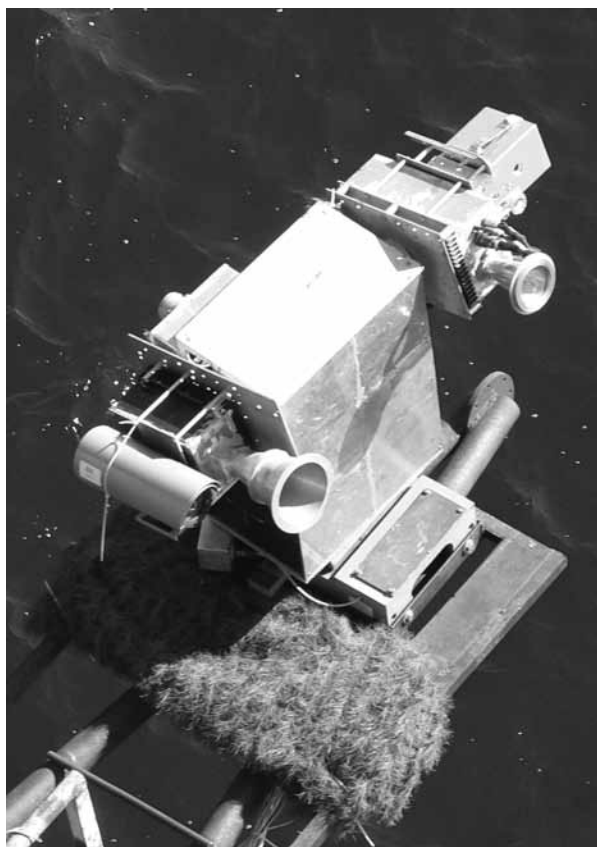


Рис. 1. Поворотная платформа «Траверс» с радиометрическим комплексом

Методика измерений заключалась в непрерывном (24 ч в сутки, за исключением остановок на техническое обслуживание или ремонт оборудования) цикличном сканировании водной поверхности. Один 30-минутный цикл состоял из двух сканирований в вертикальном направлении (вверх/вниз) на шести азимутальных углах поворота платформы, и сканирований по азимуту на четырёх вертикальных углах. В начале и конце каждого цикла сканирования приборы поворачивались в сторону радиопоглощающего материала, используемого в качестве абсолютно чёрного тела. Калибровка радиометров осуществлялась на основе измерений температур атмосферы и чёрного тела.

За время натурных исследований, проведённых в 2005 г. с 1 по 21 июня; в 2007 г. — с 12 по 21 августа; в 2009 г. — с 20 по 27 октября и в 2012 г. — с 5 по 23 июня, было накоплено большое количество экспериментальных данных. Базу накопленных данных можно разделить на несколько блоков:

- блок временных данных, содержащий данные о фактическом времени измерений и служащий для сопряжения данных, зарегистрированных на разных устройствах и персональных компьютерах;
- блок радиометрических данных, в который входят результаты измерений, полученные с помощью радиометров на разных частотах и поляризациях;
- блок данных инклинометров, содержащий данные тангажа и крена каждого радиометра и рыскания поворотной платформы;
- блок метеоданных, включающий данные о температуре воды и воздуха, скорости и направлении ветра, атмосферном давлении и влажности;
- блок вспомогательных данных, в который входят данные фотосъёмки, журнал с записями о состоянии оборудования и важных событиях эксперимента и различная дополнительная информация.

КАЛИБРОВКА «РАЗНОСТНОГО» КАНАЛА РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ПРИЁМНИКА

Разработанный в ИКИ РАН радиометр, работающий на длине волны 8 мм, производит измерения собственного излучения объектов, как указывалось выше, на вертикальной, горизонтальной поляризациях и на так называемом «разностном» канале. «Разностный» канал радиометра на выходе даёт оцифрованный сигнал $X_R^{code} = X_{+45^\circ}^{code} - X_{-45^\circ}^{code}$. ($X_{\pm 45^\circ}^{code}$ — оцифрованный сигнал, полученный на линейных поляризациях $\pm 45^\circ$).

Для калибровки «разностного» канала использовались данные эксперимента, проводимого в Геленджике в 2005 г.; измерения проводились при отсутствии волнения, с конца пирса, удалённого в море на 200 м, на вертикальном угле 45 и 65°.

Методика проведения измерений заключалась в следующем. Радиометр был закреплён на треноге, с помощью поворотного механизма осуществлялось вращение базиса антенной системы относительно оси симметрии. По результатам измерений для всех

радиометрических каналов были получены периодические зависимости изменения радиояркостной температуры от угла поворота базиса антенной системы, определяемые следующей функцией:

$$X_i^{code}(\theta) = a \cos(2(\theta + \varphi)) + C, \quad (9)$$

где i — номер радиометрического канала; a — амплитуда изменения радиояркостной температуры водной поверхности, представленной в кодах амплитудно-цифрового преобразователя (АЦП); θ — угол поворота базиса антенной системы; φ — фазовый сдвиг изменения радиояркостной температуры; C — постоянный уровень смещения изменения радиояркостной температуры.

Для перехода от кодов АЦП к радиояркостной температуре необходимо было связать разностный канал с вертикальной или горизонтальной поляризацией, калибровочные коэффициенты которых известны. Переходные коэффициенты $x1_{V,H}^p$ и $x2_{V,H}^p$ определялись из уравнения:

$$\begin{aligned} & [a_R \cos(2(\theta_R + \varphi_R)) + C_R] x1_{V,H}^p + x2_{V,H}^p = \\ & = a_{V,H} \cos(2(\theta_{V,H} + \varphi_{V,H} + 45^\circ)) - a_{V,H} \cos(2(\theta_{V,H} + \varphi_{V,H} - 45^\circ)). \end{aligned} \quad (10)$$

Выражение для разности температуры, полученной на «разностном» канале, имеет вид:

$$\Delta T_R = \frac{X_R^{code} - x2_{V,H}^p}{x1_{V,H}^p} alv_{V,H}, \quad (11)$$

где ΔT_R — радиояркостная температура «разностного» радиометрического канала; $alv_{V,H}$ — амплитудный калибровочный коэффициент для вертикальной или горизонтальной поляризаций. В данной работе для калибровки разностного канала использовались калибровочные коэффициенты горизонтальной поляризации.

ВЫБОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА

Для исследования эффекта азимутальной анизотропии были выбраны данные, полученные с помощью радиометра-поляриметра Р-08. Основные характеристики данного прибора представлены ниже.

Характеристики радиометра-поляриметра Р-08

Диапазон длин волн 8 мм
 Поляризация V, H, $\pm 45^\circ$
 Ширина луча 9°
 Чувствительность 0,15 К

На первом этапе исследований производилась первичная сортировка экспериментальных данных. Один из главных параметров отбора данных — отсутствие сбоев измерительного оборудования во время экспериментальных измерений. Для анализа были выбраны данные, полученные при сканировании по азимуту на вертикальном угле от 49 до 51°.

Следующие важные параметры сортировки экспериментальных данных — метеоусловия. Были выбраны записи радиотеплового излучения водной поверхности, полученные при стабильном восточном или западном направлении ветра. Выбраны данные при возрастании или убывании скорости приповерхностного ветра от 3 до 15 м/с. В работе анализируются данные, полученные при условии, что температура воздуха больше температуры воды или равна ей.

С использованием результатов периодической фотосъёмки были отсортированы данные по дополнительным параметрам. Первый из них — безоблачное небо в месте проведения измерений, что необходимо для проведения качественной калибровки радиометров. Далее — отсутствие прямого солнечного излучения и элементов конструкции платформы в поле зрения измерительных приборов, а также отсутствие пенных образований на поверхности моря.

Перечисленные параметры сортировки достаточно сильно сократили количество экспериментальных данных, пригодных для анализа: из данных четырёх экспериментов осталось только четырнадцать записей азимутальных виражей, полученных в августе 2007 г.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Анализ проводился для данных, полученных в диапазоне скоростей ветра от 3 до 15 м/с и для вертикальных углов наблюдения от 49 до 52°. Для калибровки каналов, содержащих вертикальную и горизонтальную поляризации, использовалась методика, учитывающая линейность отклика АЦП на принятое излучение [Александров, 2002]. На рис. 2 представлены графики измеренной радиояркостной температуры водной поверхности в зависимости от азимутального угла визирования.

Как видно из графиков (см. рис. 2), при сканировании по азимутальному углу наблюдается модуляция принимаемого излучения длинными волнами.

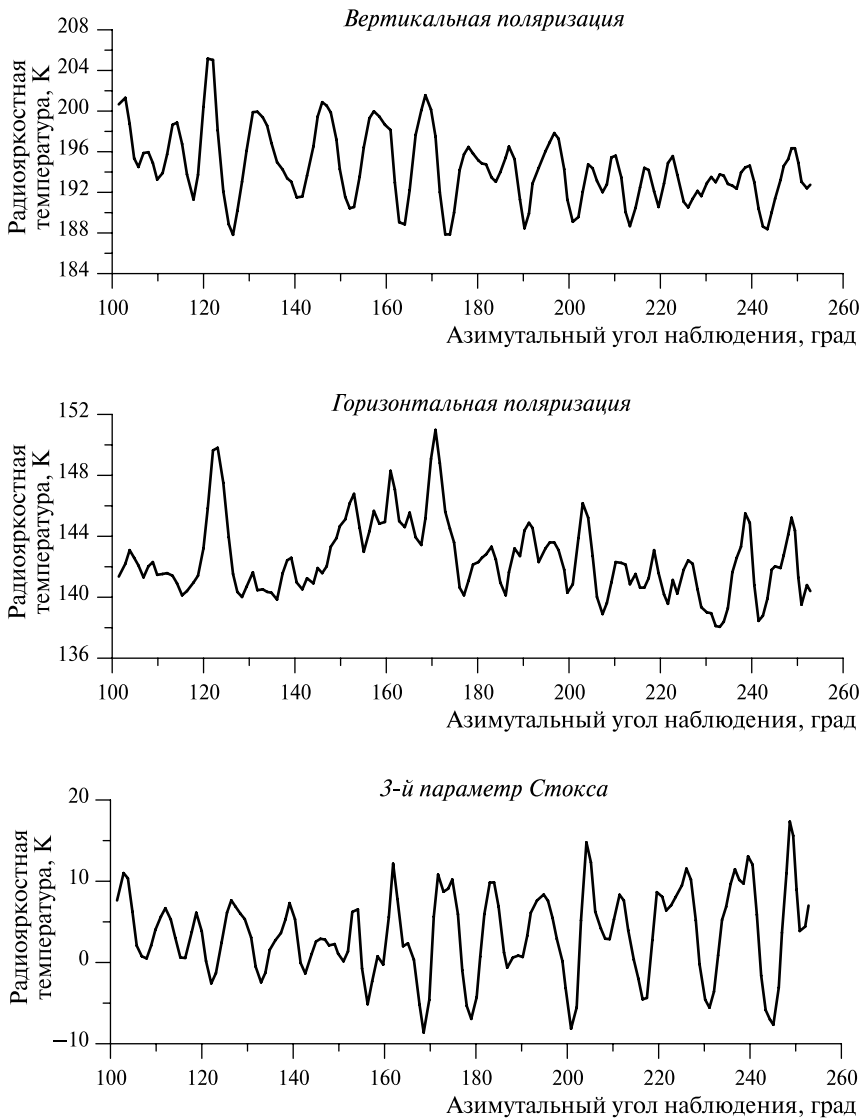


Рис. 2. Экспериментально полученная азимутальная зависимость радиояркой температуры водной поверхности при скорости ветра 9...10 м/с и вертикальном угле наблюдения 50°

Это связано с низким расположением измерительного комплекса (~4 м над уровнем моря), вследствие чего ширина луча диаграммы направленности по уровню половинной мощности имеет малый размер при пересечении водной поверхности. Таким образом, длинные гравитационные волны вносят дополнительное приращение излучения в зависимости от склона, попавшего в луч диаграммы направленности антенны радиометра.

Для уменьшения влияния модуляции принимаемого излучения длинными волнами экспериментальные данные усреднялись методом скользящего среднего. Результат такого усреднения с предварительно вычтенным значением гладкой водной поверхности показан на рис. 3.

Для анализа анизотропии были проанализированы записи сканирования, полученные при схожих метеоусловиях, т.е. при одинаковых скоростях и направлениях ветра, температурах воды и воздуха. Также проводилось накопление вариаций радиояростной температуры, для чего использовались данные, отстоящие друг от друга по времени не более чем на 2 ч. Для каждого виража выполнялась привязка к направлению ветра — совмещение азимутального угла визирования и направления ветра с нулевым направлением. На рис. 4 приведены два виража и построенная на их основе аппроксимация по формулам (7).

На рис. 5 приведены графики коэффициентов a_1 и a_2 формулы (7) для первых трёх модифицированных параметров Стокса.



Рис. 3. Скользящее усреднение радиояростного контраста (графики для горизонтальной поляризации и третьего параметра Стокса имеют аналогичный вид)

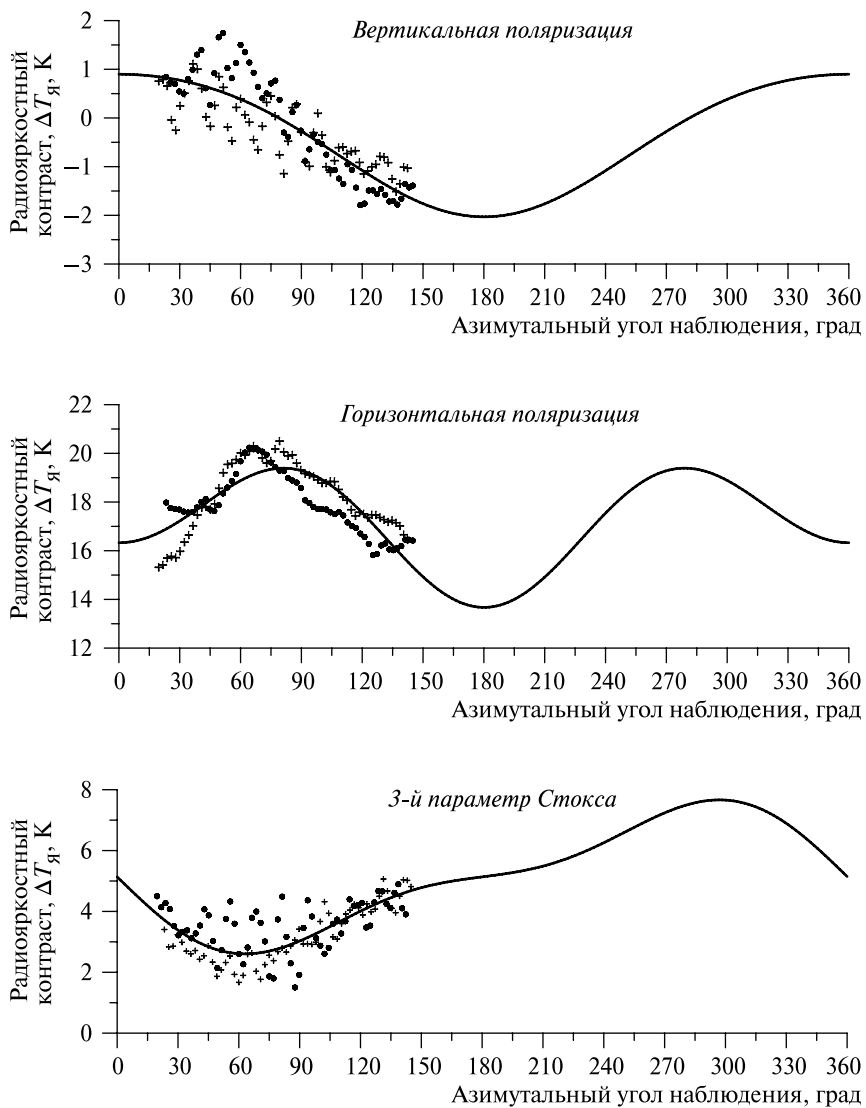


Рис. 4. Аппроксимация азимутальных выражений по формулам (7). Кружками и крестиками показаны азимутальные выражения, используемые при аппроксимации

Для модели [Meissner, Wentz, 2012] и экспериментальных данных вертикальный угол наблюдения равен 50° , для данных радиометра SSM/I — 53° , для данных, полученных в Лаборатории реактивного движения НАСА (JPL NASA — Jet Propulsion Laboratory National Aeronautics and Space Administration) с самолётов-лабораторий DC-8 и P-3, вертикальный угол — 55° , и на основе измерений сотрудниками лаборатории ETL NOAA (East Trout Lake National Oceanic and Atmospheric Administration) в эксперименте COPE (Coastal Ocean Probing Experiment) с дирижабля — 55° .

Представленные на рис. 5 зависимости, полученные по небольшому набору экспериментальных данных, показывают хорошее совпадение результатов с модельным расчётом, особенно для горизонтальной поляризации принимаемого излучения.

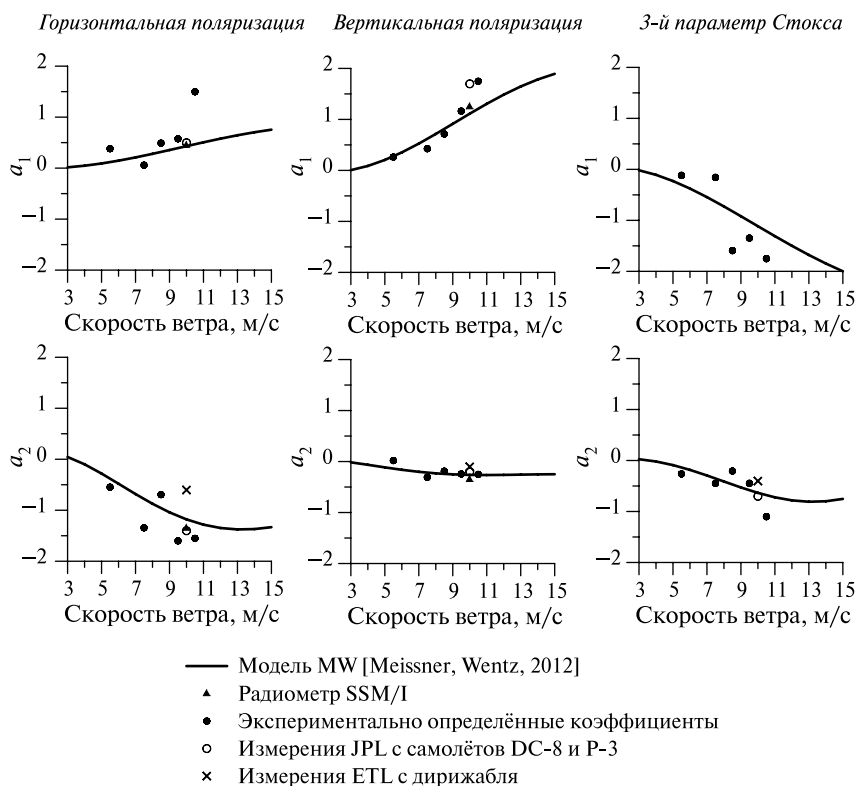


Рис. 5. Зависимость первого и второго гармонических коэффициентов азимутальной анизотропии взволнованной водной поверхности от скорости ветра

Для первого коэффициента на вертикальной и горизонтальной поляризациях прослеживается увеличение по сравнению с моделью при скоростях ветра более 9 м/с. Стоит отметить, что для вертикальной поляризации значения первого и второго коэффициентов в основном больше модельных значений по абсолютной величине. Для третьего параметра Стокса первый коэффициент имеет разброс относительно модельных расчётов, в то время как второй коэффициент достаточно близок. Также видна сходимость результатов с данными спутниковых и самолётных измерений, полученных с помощью различных приборов и при различных условиях наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментов CAPMOS был выполнен анализ данных натуральных экспериментальных измерений азимутальных вариаций собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в 8-мм диапазоне длин волн. Анализ показал хорошее совпадение результатов экспериментального исследования эффекта азимутальной анизотропии как с модельным расчётом, так и с данными спутниковых и самолётных измерений.

В ходе работы проведена калибровка и обработаны данные, полученные на «разностном» линейном канале радиометра Р-08, используемого в экспериментах CAPMOS. Было выполнено накопление данных сканирования по азимуту. Для накопления использовались данные, отстоящие друг от друга по времени не более чем на 2 ч. Накопленные экспериментальные данные были усреднены методом скользящего среднего для уменьшения модуляции принимаемого радиотеплового излучения длинными волнами. Проведена аппроксимация азимутальных записей радиояркостного контраста взволнованной водной поверхности квазигармоническими функциями для определения коэффициентов азимутальной анизотропии собственного радиотеплового излучения.

Предложено изменить схему проведения экспериментальных измерений собственного излучения водной поверхности:

- увеличить высоту размещения поворотно-сканирующей платформы для уменьшения модуляции принимаемого радиотеплового излучения длинными волнами;
- увеличить угол азимутального обзора, что уменьшит ошибку определения азимутальных вариаций радиояркостного контраста;

- увеличить количество вертикальных углов визирования для получения возможности исследования эффекта азимутальной анизотропии в пространстве.

Основным направлением развития данной работы является, во-первых, использование многочастотных радиополяриметрических измерений при исследовании азимутальной анизотропии; во-вторых, накопление и анализ экспериментальных данных, полученных для вертикальных углов визирования вне диапазона 49...52°; разработка метода определения скорости и направления приповерхностного ветра на произвольном угле визирования, а также использование полученных данных в качестве дополнительного материала при разработке модели ветрового волнения.

Авторы выражают благодарность Комаровой Наталии Юрьевне за помощь в оформлении препринта.

ЛИТЕРАТУРА

- [Александров, 2002] Александров Д. В. Верификация СВЧ-моделей диэлектрической проницаемости воды по данным угловых измерений собственного радиоизлучения в миллиметровом диапазоне длин волн: Препринт. М.: ИКИ РАН, 2002. Пр-2066. 36 с.
- [Башаринов и др., 1974] Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение земли как планеты // М.: Наука, 1974. 187с.
- [Беспалова и др., 1979] Беспалова Е. А., Веселов В. М., Готов А. А., Милицкий Ю. А., Мировский В. Г., Покровская И. В., Попов А. Е., Раев М. Д., Шарков Е. А., Эткин В. С. Исследование анизотропии ветрового волнения по вариациям поляризованного теплового излучения // Докл. АН СССР. 1979. Т. 246. № 6. С. 1482–1485.
- [Беспалова и др., 1982] Беспалова Е. А. и др. Об определении скорости приповерхностного ветра по измерениям поляризационной анизотропии собственного и рассеянного СВЧ-излучения // Исслед. Земли из космоса. 1982. № 1. С. 87–94.
- [Гречко и др., 1991] Гречко С. И., Ирисов В. Г., Кузьмин А. В., Трохимовский Ю. Г., Эткин В. С. Характеристики собственного СВЧ-излучения морской поверхности на настильных углах наблюдения: Препринт. М.: ИКИ РАН, 1991. Пр-1729. 41 с.
- [Кузьмин и др., 2009] Кузьмин А. В., Горячкин Ю. А., Ермаков Д. М., Ермаков С. А., Комарова Н. Ю., Кузнецов А. С., Репина И. А., Садовский И. Н., Смирнов М. Т., Шарков Е. А., Чухарев А. М. Морская гидрографическая платформа «Кацивели» как подспутниковый полигон на Чёрном море // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 1. С. 31–44.
- [Поспелов, 2004] Поспелов М. Н. Применение поляризационной радиометрии в дистанционном зондировании: история и перспективы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. С. 58–69.

- [Germain et al., 2002] *Germain K. St., Poe G. A., Gaiser P. W.* Polarimetric emission model of the sea at microwave frequencies and comparison with measurements // *Progress in Electromagnetics Research*. 2002. V. 37. P. 2–32.
- [Meissner, Wentz, 2004] *Meissner T., Wentz F.J.* The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2004. V. 42. N. 9. P. 1836–1849.
- [Meissner, Wentz, 2012] *Meissner T., Wentz F.J.* The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incidence angles // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2012. V. 50. N. 8. P. 3004–3026.
- [Yueh et al., 1995] *Yueh S. H., Wilson W.J., Li F. K., Nghiem S. V., Ricketts W. B.* Polarimetric measurements of sea surface brightness temperature using an aircraft K-band radiometer // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1995. V. 33. N. 1. P. 85–92.
- [Wentz, 1992] *Wentz F.J.* Measurements of oceanic wind vector using satellite microwave radiometers // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1992. V. 30. N. 5. P. 960–972.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Эмпирическая модель собственно теплового излучения взволнованной водной поверхности [Meissner, Wentz, 2012]

Эмпирическая модель Томаса Месснера и Френка Венца (модель MW) построена на основе анализа измерений радиояркой температуры со спутников WindSat и SSM/I F13, описывает излучение в узком диапазоне вертикальных углов наблюдения (от 49 до 56°) и даёт малую ошибку при скоростях ветра от 3 до 15 м/с.

Собственное радиотепловое излучение взволнованной водной поверхности по модели MW определяется следующим образом:

$$T_{\text{я}} = T_S (E_0 + \Delta E_W + \Delta E_{\phi}), \quad (\text{П1})$$

где T_S — температура воды; ΔE_W — изотропное приращение излучения в зависимости от скорости ветра; ΔE_{ϕ} — анизотропное приращение излучения в зависимости от скорости ветра и азимутального угла наблюдения; E_0 — коэффициент теплового излучения гладкой водной поверхности.

Коэффициент теплового излучения E_0 связан с коэффициентом отражения соотношением: $E + |R|^2 = 1$. Коэффициент отражения R определяется по известным формулам Френеля для вертикальной и горизонтальной поляризаций:

$$|R_V(\theta)|^2 = \left| \frac{\varepsilon \cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}} \right|^2, \quad (\text{П2})$$

$$|R_H(\theta)|^2 = \left| \frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}} \right|^2, \quad (\text{П3})$$

где ε — комплексная диэлектрическая проницаемость [Meissner, Wentz, 2004] с поправками из работы [Meissner, Wentz, 2012]; θ — угол, характеризующий направление излучения в вертикальной плоскости.

Изотропное приращение излучения взволнованной водной поверхности в зависимости от скорости ветра определяется следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \Delta E_W^{P,f}(\theta, W, T_S, S) = \Delta E_W^{nad,f}(W, T_S, S) + \\ + \left[\Delta E_W^{P,f}(\theta_{ref}, W, T_S, S) - \Delta E_W^{nad,f}(W, T_S, S) \right] \left(\frac{\theta}{\theta_{ref}} \right)^{x_p}, \end{aligned} \quad (\text{П4})$$

где W — скорость ветра; S — солёность воды; θ_{ref} — опорный вертикальный угол наблюдения, $\theta_{ref} = 55,2^\circ$; f — частота принимаемого излучения; p — поляризация вертикальная (V) и горизонтальная (H); коэффициенты для вертикальной и горизонтальной поляризации: $x_V = 4,0$ и $x_H = 1,5$.

$$\Delta E_W^{nad,f}(W, T_S, S) = \frac{1}{2} \left[\Delta E_W^{V,f}(\theta_{ref}, W, T_S, S) + \Delta E_W^{H,f}(\theta_{ref}, W, T_S, S) \right], \quad (\text{П5})$$

$$\Delta E_W^{P,f}(\theta_{ref}, W, T_S, S) = \delta_{ref}^{p,f}(W) \frac{E_0^{p,f}(\theta_{ref}, T_S, S)}{E_0^{p,f}(\theta_{ref}, T_{ref}, S)}, \quad (\text{П6})$$

здесь T_{ref} — опорная частота, $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$.

$$\delta_{ref}^{p,f}(W) = \sum_{k=1}^5 \delta_k^{p,f} W^k, \quad (\text{П7})$$

Коэффициенты $\delta_k^{p,f}$ для частоты $f = 37$ ГГц приведены в табл. П1.

Анизотропное приращение излучения взволнованной водной поверхности от скорости ветра и направления зондирования определяется следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \Delta E_\phi^{p,f}(\theta; W, \phi) = \\ = \begin{cases} A_1^{p,f}(\theta; W) \cos(\phi) + A_2^{p,f}(\theta; W) \cos(2\phi) & p = V, H, \\ A_1^{p,f}(\theta; W) \sin(\phi) + A_2^{p,f}(\theta; W) \sin(2\phi) & p = S3, S4. \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{П8})$$

где ϕ — угол между направлением ветра и направлением зондирования, $S3, S4$ — параметры Стокса.

$$A_i^{p,f}(\theta; W) = A_i^{p,f}(\theta = 0; W) + \left[A_i^{p,f}(\theta_{ref}; W) - A_i^{p,f}(\theta = 0; W) \right] \times \left(\frac{\theta}{\theta_{ref}} \right)^{x_{pi}}, \quad p = S1, S2, S3, S4, \quad i = 1, 2. \quad (\text{П9})$$

Значения x_{pi} приведены в таблице П2.

$$A_2^{S2,f}(\theta = 0; W) = -A_3^{S2,f}(\theta = 0; W) = u(W)s(f), \quad (\text{П10})$$

где $u(W)$ и $s(f)$ равны:

$$\left. \begin{aligned} u(W) &= \frac{\left[W^2 - \frac{W^3}{22,5} \right]}{55,5556}, \\ s(f) &= \frac{2}{290} \left[1,0 - \lg \left(\frac{30}{f} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П11})$$

Частота f измеряется в гигагерцах.

$$\left. \begin{aligned} A_i^{p,f}(\theta_{ref}; W) &= \sum_{k=1}^5 \alpha_{i,k}^{p,f} W^k, \\ p &= \text{V, H, S3, S4}, \quad i = 1, 2. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П12})$$

Коэффициенты $\alpha_{i,k}^{p,f}$ для частоты $f = 37$ ГГц приведены в табл. П3.

Таблица П1

1	2	3	4	5
V				
-7,03594E-04	-2,17673E-04	4,00659E-05	-1,84769E-06	2,76830E-08
H				
5,63832E-03	-8,43744E-04	1,06734E-04	-4,61253E-06	6,67315E-08

Таблица П2

i	V	H	S3	S4
1	2,0	1,0	1,0	2,0
2	2,0	4,0	4,0	2,0

Таблица ПЗ

1	2	3	4	5
<i>i = 1</i>				
V				
-2,41163E-04	7,66737E-05	3,65641E-06	-5,59326E-07	1,35655E-08
H				
-5,43465E-05	2,2436E-05	1,16736E-06	-1,58769E-07	3,60149E-09
S3				
2,55925E-04	-1,0271E-04	3,06653E-06	6,84854E-08	-2,8383E-09
S4				
0	0	0	0	0
<i>i = 2</i>				
V				
2,3525E-04	-1,24502E-04	1,48805E-05	-7,07241E-07	1,18776E-08
H				
7,26916E-04	-2,84727E-04	2,20935E-05	-5,68143E-07	3,00983E-09
S3				
1,37851E-04	-1,58017E-05	-9,08052E-06	9,03144E-07	-2,167E-08
S4				
-1,33456E-04	7,09317E-05	-8,67173E-06	3,9891E-07	-6,31997E-09

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН

117997, Москва, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати 31.05.2013

Заказ 3214

Формат 70×108/32

Тираж 75

1 усл.-изд. л.