

ИЗЛУЧЕНИЕ ВЗВОЛНОВАННОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАК ФУНКЦИЯ ОТ УГЛА ВИЗИРОВАНИЯ, СКОРОСТИ ВЕТРА И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ

Д.С. Сазонов

Институт космических исследований Российской академии наук

Введение

Информация о состоянии земной поверхности, получаемая посредством приборов спутникового базирования, стала неотъемлемой частью теоретических изысканий и получила широкое практическое применение (например: прогнозирование погоды, контроль загрязнений, экологические исследования и т.д.). Одной из задач в области исследования земли из космоса является изучение Мирового океана с помощью микроволновых радиометров, которые измеряют собственное восходящее излучение системы океан-атмосфера. Радиометрические измерения применяются для определения температуры поверхности океана, вектора ветра, измерений солености, профилирования атмосферы, исследований стихийных бедствий (к сожалению постфактум).

До сих пор ведутся работы по установлению взаимно-однозначной связи между измеренным излучением поверхности в микроволновом диапазоне и физическими параметрами водной и воздушной сред. Созданы модели позволяющие рассчитать восходящее излучение поверхности используя либо спектр морского волнения, либо набор аппроксимирующих функций. Однако, результаты таких расчетов расходятся между собой и, как показано в работе (Сазонов и др., 2016), недостаточно адекватно описывают угловую зависимость восходящего излучения, полученную экспериментально.

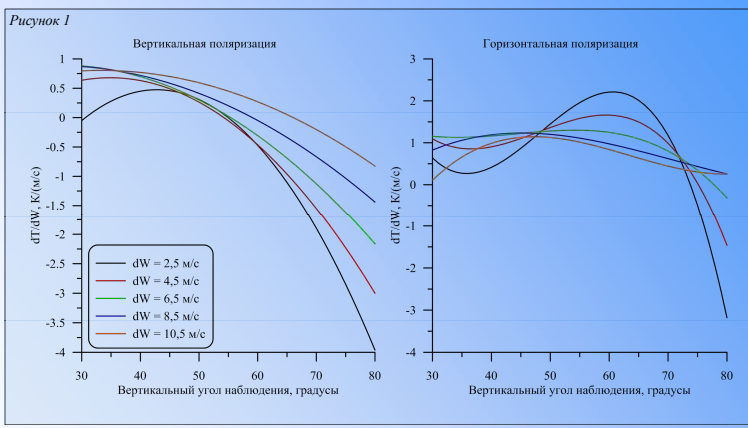
Цели работы:

- Построение модели радиоизлучения взволнованной водной поверхности для частоты излучения 37,5 ГГц.
- Сравнение полученной модели с экспериментальными данными и другими моделями.

Обзор эксперимента

В период с 2005 по 2016 годы на океанографической платформе принадлежащей федеральному государственному бюджетному учреждению науки "Черноморскому гидрофизическому полигону РАН" (ЧГП РАН) была проведена серия натурных исследований взаимодействия океана и атмосферы. Платформа расположена на южной оконечности полуострова Крым близ п. Качивели, (географические координаты: 44°23'35" с.ш., 33°59'04" в.д.). Удаленность платформы от берега составляет порядка 600 метров, а глубина моря - 30 метров. В весенне-летний и осенний периоды времени в районе платформы преобладают ветра западного и восточного направления, что делает платформу уникальным местом для изучения ветровых зависимостей собственного излучения водной поверхности в контролируемых метеословиях.

В ходе экспериментальных исследований с помощью микроволновых радиометрических приборов (радиометров) проводились измерения собственного восходящего излучения взволнованной водной поверхности (радиояркости температуры) и нисходящего излучения атмосферы.



Сравнение модельной функции с экспериментальными данными 2009 года

Представленные графики (рисунок 2) наглядно демонстрируют сходство между экспериментом и расчетом. Предлагаемая функция повторяет ход зависимости и находится внутри доверительного интервала. Чтобы сравнение было полным, рассчитаны коэффициенты корреляции r и значения функции невязки ξ между экспериментом и моделью. Сформулированы гипотезы H_0 , говорящая об отсутствии корреляции между экспериментальными данными и модельными расчетами, и гипотеза H_1 , говорящая о существовании статистически значимой корреляции. Проведя необходимые вычисления было получено, что при уровне достоверности $\alpha = 5\%$ принимается гипотеза H_0 если $r \leq 0.281$ и принимается гипотеза H_1 если $r > 0.281$ и чем дальше значение r от границы, тем сильнее корреляция. На рисунках 2 представлены рассчитанные значения коэффициента корреляции и невязки.

Из графиков можно сделать вывод о наличии значимой корреляции между значениями крутизны радиационно-ветровой зависимости, полученных по данным 2009 года, и разработанной моделью. Наибольшая корреляция соответствует диапазону скорости ветра 7-8 м/с для вертикальной поляризации и диапазону 9-10 м/с для горизонтальной поляризации. Анализ невязок для диапазонов скоростей ветра 6-7, 7-8 и 8-9 м/с показывает, что модельная функция сходится с экспериментом и значения невязки не более 20 К/(м/с). Если учесть что при расчете невязок используется 50 точек и выполнить нормировку невязки на количество точек, чтобы узнать среднюю ошибку для одной точки, получим ошибку не более $20/50 = 0.4$ К/(м/с). Величина этой ошибки и значимый уровень корреляции говорят о том, что модель с достаточной точностью описывает поведение радиационно-ветровой зависимости.

Рисунок 2. Сравнение разработанной модели с экспериментом 2009 года.

Моделирование

В настоящей работе моделируется крутизна радиационно-ветровой зависимости собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности, которая является частной производной яркостной температуры по скорости ветра $\frac{\partial T_b}{\partial W} / \text{K(w/c)}$. Анализ, выполненный в работе (Сазонов и др., 2016), показал, что среди известных моделей выбранных для анализа моделей нет ни одной, адекватно описывающей поведение радиационно-ветровой зависимости в полном диапазоне исследуемых углов наблюдения и скоростей ветра. Кроме того, дополнительный корреляционный анализ показал, что существует значимая корреляция между экспериментальными и модельными данными, однако, анализ невязок показал, что есть расхождения по абсолютному уровню. Поэтому было принято решение разработать функциональную зависимость крутизны радиационно-ветровой характеристики на основе экспериментальных измерений.

Этапы моделирования состоят из трех частей: (1) моделирование угловой зависимости, (2) моделирование ветровой зависимости и (3) моделирование температурной зависимости.

Угловая зависимость.

На основе полученных экспериментальных зависимостей получилось подобрать аппроксимацию, которая с высокой корреляцией описывает имеющиеся данные. Таким образом, для вертикальной поляризации оптимальной функцией стал полином второго порядка (1), а для горизонтальной поляризации – полином третьего порядка (2).

В формулах 1 и 2: i – номер члена полинома; α_i^V – коэффициент полинома угловой зависимости; p – поляризация; θ – вертикальный угол наблюдения в градусах отсчитанных от надира.

$$\frac{\partial T_b}{\partial W}(\theta) = \sum_{i=0}^2 \alpha_i^V \cdot \theta^i \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_b}{\partial W}(\theta) = \sum_{i=0}^3 \alpha_i^H \cdot \theta^i \quad (2)$$

Ветровая зависимость

Все полученные коэффициенты полиномов 1 и 2 построены как зависимость от диапазона приращения скорости ветра ΔW . Для описания ветровой зависимости коэффициентов α_i^V также были выбраны полиномы третьего порядка (3) для вертикальной поляризации и второго порядка (4) для горизонтальной. В формулах 3 и 4: δ_i^V – коэффициент полинома ветровой зависимости.

$$\alpha_i^V(\Delta W) = \sum_{i=0}^3 \delta_i^V \cdot \Delta W^i \quad (3)$$

$$\alpha_i^H(\Delta W) = \sum_{i=0}^2 \delta_i^H \cdot \Delta W^i \quad (4)$$

Температурная зависимость

Коэффициенты полиномов 3 и 4 построены как зависимость от температуры воды T_w и аппроксимированы линейной функцией (5). Коэффициенты температурной зависимости γ_i^V Приведены в таблице 1.

$$\delta_i^V(T_w) = \gamma_0^V + \gamma_1^V \cdot T_w \quad (5)$$

Разработанная модель представлена на рисунке 1 для температуры воды 21С.

Таблица 1. Коэффициенты температурной зависимости

	Вертикальная поляризация					
	α_0		α_1		α_2	
	γ_0	γ_1	γ_0	γ_1	γ_0	γ_1
δ_0	28.78659407	-2.066864079	-1.063038805	0.07979982537	0.007539419	-0.000654801
δ_1	-19.12230869	1.14119177	0.7705315636	-0.04503785727	-0.00673862	0.000393637
δ_2	3.274376821	-0.1798996139	-0.1332461307	0.007172712604	0.001217597	-6.47103E-005
δ_3	-0.1633341796	0.00857104691	0.006658444267	-0.00034337104	-6.21587E-005	3.165912E-006
	Горизонтальная поляризация					
	α_0		α_1		α_2	
	γ_0	γ_1	γ_0	γ_1	γ_0	γ_1
δ_0	64.3125	-1.2044	-4.82937	0.09501	0.110918	-0.0007654
δ_1	-9.0776	0.1292	0.75683	-0.01149	-0.018112	0.0002899
δ_2	0.316605	-0.007455	-0.03024	0.000584	0.0007683	-0.000014

Литература

Apel, J.R. An improved ocean surface wave vector spectrum // J. Geophysical Research. 1994. V. 99. N. C8. P. 16.269–16.291.

Durden S.L., Vesecky J.F. A physical radar cross-section model for a wind-driven sea with swell // IEEE J. of Oceanic Engineering. 1985. V. OE-10. N. 4. P. 445–451.

Efouhaily, T., Chapron, B., Katsaros, K., Vandemark, D. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. N. C7. P. 15.781–15.796.

Meissner Th., Wentz F.J. The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and Earth incident angles // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. N. 8. P. 3004–3026.

Сазонов Д.С., Кузьмин А.В., Садовский И.Н. Экспериментальные исследования ветровой зависимости собственного излучения взволнованной морской поверхности // Исслед. Земли из космоса, 2016, №1-2, С. 25-34.

Сазонов Д.С. Корреляционный анализ экспериментальных дистанционных измерений и модели микроволнового излучения взволнованной водной поверхности // Исслед. Земли из космоса, 2017, в печати.

Сравнение разработанной функции с другими моделями

Сравнения разработанной модели с другими будет производиться в терминах радиояростного контраста, т.е. зависимости приращения излучения от скорости ветра. Теоретический расчет радиояростного контраста был выполнен с использованием моделей спектра гравитационно-капиллярных волн, разработанных Дж.Р. Апелем (Apel, 1994), Т. Элфухайли (Efouhaily et al., 1997) и С.Л. Дурденом (Durden, Vesecky, 1985). Приведенные модели позволяют проводить расчеты интенсивности собственного излучения водной поверхности для частот 1...40 ГГц, вертикальных углов наблюдения 0...70-80 градусов и для скоростей ветра до 20 м/с. Поскольку далее анализируются результаты модельных расчетов, основанных на указанных аппроксимациях спектральных кривых, а не самих моделей спектров, для сокращения, далее предлагается использовать обозначение: «модель А (Е или D)». Также расчеты радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности были проведены по полумпирической модели ветрового волнения, разработанной Т. Мейсснером и Ф. Вентцем (Meissner, Wentz, 2012) (модель MW).

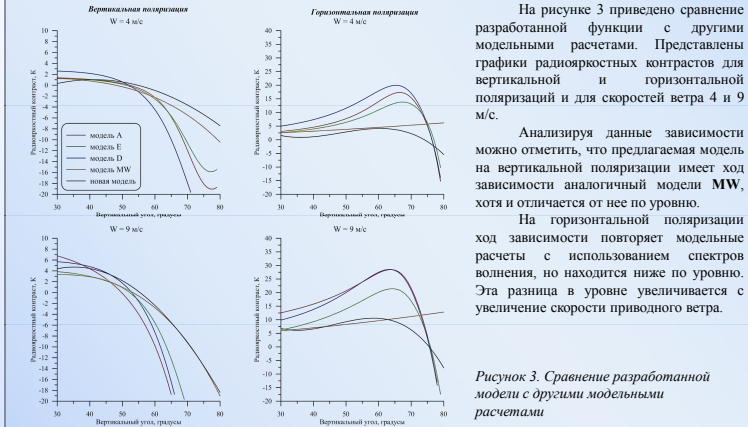


Рисунок 3. Сравнение разработанной модели с другими модельными расчетами

Заключение

В настоящей работе была разработана модель радиоизлучения взволнованной водной поверхности для частоты излучения 37,5 ГГц. Данная модель выполнена на основе экспериментально полученных данных и представляет собой зависимость крутизны радиационно-ветровой зависимости от температуры воды, изменения скорости ветра и угла наблюдения. На основе предлагаемой модели могут быть рассчитаны радиояростный контраст и радиояростная температура для вертикальной и горизонтальной поляризации принимаемого излучения.

На данном этапе было проведено сравнение полученной модели с экспериментальными данными и в дальнейшем модель будет протестирована на способность решать обратную задачу (восстанавливать скорость приводного ветра по радиополариметрическим измерениям).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №14-02-00839_а и №15-05-08401_а.