

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МИКРОВОЛНОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ГРАНИЧНОГО СЛОЯ ОКЕАН-АТМОСФЕРА

Д.С. Сазонов

Институт космических исследований Российской академии наук

Введение

Дистанционные наблюдения Земли из космоса позволяют решать большое количество научных и прикладных задач. Спутниковые наблюдения позволяют определять характеристики окружающей среды с достаточно хорошей точностью в пространстве и во времени. Одной из важных задач, решаемых с помощью дистанционных наблюдений, является исследования системы океан-атмосфера.

На протяжении нескольких десятилетий ведутся работы по установлению взаимно-однозначной связи между измеренным излучением системы океан-атмосфера в микроволновом диапазоне и физическими параметрами водной и воздушной сред. Созданы модели, позволяющие рассчитать восходящее излучение от поверхности.

В цикле работ по исследованию собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности, автором был проведен анализ радиационно-ветровой зависимости и азимутальной анизотропии, и выполнено сравнение экспериментальных данных с модельными расчетами. Корреляционный анализ показал, что существует значимая корреляция между экспериментальными и модельными данными, однако, анализ невязок показал, что есть расхождения по абсолютному уровню. Качественный анализ азимутальной анизотропии показал, что экспериментальные данные сходятся с модельным расчетом в основном только для вертикальной поляризации. Так как ни одна из используемых моделей не описывает результаты экспериментальных наблюдений с достаточным уровнем достоверности, было принято решение разработать функциональное представление для описания радиационно-ветровой зависимости и азимутальной анизотропии.

Цели работы:

Целью настоящей работы является построение модели радиоизлучения взволнованной водной поверхности на основе детальных экспериментальных радиометрических измерений на частоте 37,5 ГГц.

Настоящая работа является продолжением цикла работ (Сазонов и др., 2016; Sazonov et al., 2016; Сазонов, 2017а,б; Сазонов и др., 2017) по анализу экспериментальных радиометрических данных.

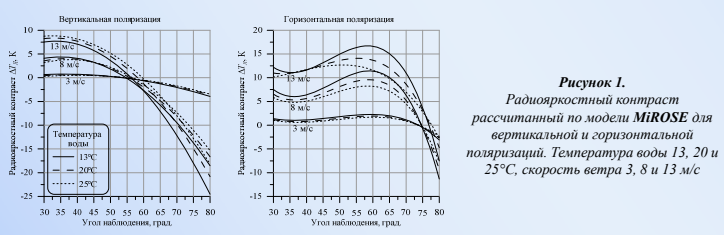


Рисунок 1. Радиометрический контраст рассчитанный по модели MIROSE для вертикальной и горизонтальной поляризации. Температура воды 13, 20 и 25°C, скорость ветра 3 и 13 м/с

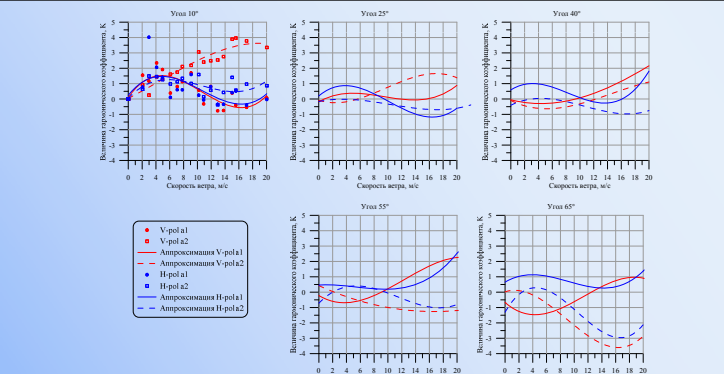


Рисунок 2. Аппроксимации по формуле 6 первого и второго гармонического коэффициента азимутальной анизотропии в зависимости от скорости приводного ветра по данным эксперимента 2016 года.

Основные результаты

Представленные в данной работе результаты разработки модели микроволнового излучения взволнованной водной поверхности на частоте 37,5 ГГц, позволили сделать следующие выводы:

- Разработанная модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности MIROSE-а адекватно (на качественном уровне) описывает результаты экспериментальных наблюдений в широком диапазоне углов наблюдения (как вертикальных, так и азимутальных), скоростей ветра и физических температур воды.
- Сравнение экспериментальных данных и регрессии, построенной на их основе, в рамках корреляционного анализа показало, что при моделировании радиационно-ветровой зависимости корреляция высокая и, следовательно, предлагаемая модель адекватно (на количественном уровне) описывает результаты наблюдений.
- Коэффициенты корреляции между моделью анизотропии и экспериментом не достаточно высоки, чтобы сказать адекватно или нет предлагаемая модель описывает результаты наблюдений. Это связано с недостатком экспериментальных данных. На качественном уровне модель анизотропии адекватно описывает результаты измерений и этого достаточно для экспресс оценки направления приводного ветра.
- Высокая степень корреляции между метеорологическими параметрами и интенсивностью радиоизлучения свидетельствует о наличии их сильной взаимосвязи, что дает возможность применять модельный расчет для восстановления вектора приводного ветра и температуры воды по угловым радиополяриметрическим измерениям.

Разработанная модель может быть использована для получения предварительных оценок скорости ветра и температуры поверхности воды, которые будут использоваться для решения различных задач дистанционного зондирования.

Литература

- 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 моделей микроволнового излучения взволнованной водной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2017. №3. С. 53-64.
- Sazonov D. S., Kuzmin A. V., Sadovskiy I. N. Experimental Studies of Thermal Radiation Intensity Dependence on Near-Water Wind Speed for Rough Sea Surface. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 9, pp. 911-919. ISSN 0001-4338. DOI: 10.1134/S0001433816090218.
- Сазонов Д.С. Моделирование микроволнового излучения взволнованной морской поверхности на основе экспериментальных данных. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. 271-287.
- Сазонов Д.С., Кузьмин А.В., Садовский И.Н. Азимутальная зависимость микроволнового излучения водной поверхности на основе дистанционных измерений на черном море. // Исслед. Земли из космоса, 2017, в печати
- Сазонов Д.С. Регрессионная модель микроволнового излучения водной поверхности на частоте 37,5 ГГц // Исслед. Земли из космоса, 2017, в печати

Моделирование радиационно-ветровой зависимости

В настоящей работе моделируется крутизна радиационно-ветровой зависимости собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности, которая является частной производной яркостной температуры по скорости ветра $\partial T_B / \partial W$. 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; a_i^V – коэффициент полинома угловой зависимости; p – поляризация; θ – вертикальный угол наблюдения в градусах отсчитанных от надира.

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

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

Ветровая зависимость

Все полученные коэффициенты полиномов 1 и 2 построены как зависимость от диапазона приращения скорости ветра ΔW . Для описания ветровой зависимости коэффициентов a_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.

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

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

Температурная зависимость

Коэффициенты полиномов 3 и 4 построены как зависимость от температуры воды T_w и аппроксимированы линейной функцией (5).

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

Разработанная модель представлена на рисунке 1.

Моделирование азимутальной анизотропии

Для моделирования эффекта азимутальной анизотропии были выбраны данные полученные с помощью радиометра ПО8П1 в 2016 году. Радиометр ПО8П1 в эксперименте 2016 года работал в режиме двух поляризаций (V, H), поэтому для данного периода будут рассмотрены азимутальные вариации только на этих поляризациях.

Азимутальная зависимость радиометрических температур на вертикальной и горизонтальной поляризациях аппроксимируется квазигармонической функцией (6):

$$\Delta T_{p, \Delta \phi}(W, \theta, \phi) = a_1(W, \theta, \phi) \cdot \cos(\phi) + a_2(W, \theta, \phi) \cdot \cos(2\phi) \quad (6)$$

в которых величина анизотропии связана с коэффициентами a_1 и a_2 , ϕ – азимутальный угол наблюдения. В 2016 году было накоплено 474 азимутальные записи изменения радиометрической температуры на каждом из 5 вертикальных углов наблюдения (10°, 25°, 40°, 55° и 60°).

Моделирование ветровой зависимости

На рисунке 2 показано, что при увеличении вертикального угла наблюдения ветровая зависимость коэффициентов a_i для обеих поляризаций увеличивается с возрастанием скорости ветра и что при увеличении вертикального угла наблюдения ветровая зависимость коэффициентов a_2 уменьшается практически до нуля при 55° и затем возрастает но с обратным знаком.

С целью описать ветровую зависимость гармонических коэффициентов азимутальной анизотропии была проведена серия аппроксимаций полиномами различных степеней. Было установлено, что увеличение степени полинома больше третьей не приводит к значительному увеличению коэффициента корреляции между гармоническими коэффициентами и аппроксимацией. Поэтому было принято решение использовать полиномом третьей степени (7), где i – номер члена полинома; β_i^V – коэффициент полинома ветровой зависимости; p – поляризация; W – скорость ветра в нормированной системе координат.

$$a_i^V(W, \theta) = \sum_{i=0}^3 W^i \cdot \beta_i^V(\theta), \quad (7)$$

$$\beta_i^V(\theta) = \sum_{i=0}^3 \theta^i \cdot \gamma_i^V(\theta), \quad (8)$$

Моделирование угловой зависимости

Коэффициенты β_i^V построены как функция от вертикального угла наблюдения и аппроксимированы полиномом третьей степени (8) в котором i – номер члена полинома; γ_i^V – коэффициент полинома угловой зависимости; θ – вертикальный угол наблюдения.

Коэффициенты азимутальной анизотропии приведены на рисунке 2.

Коэффициенты корреляции между гармоническими коэффициентами азимутальной анизотропии по модели и эксперименту

Гармонический коэффициент	Вертикальный угол наблюдения, град.					По всем углам	
	10	25	40	55	65		
V	a_1	0,7956	0,2856	0,6204	0,6465	0,4883	0,5865
	a_2	0,9571	0,596	0,3888	0,1068	0,7657	0,7891
H	a_1	0,6234	0,5441	0,4157	0,3975	0,2647	0,4455
	a_2	0,3944	0,1626	0,2425	0,318	0,4813	0,3735

Заключение

Предлагаемая модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности MIROSE (Microwave Rough Ocean Surface Emission model) описывает результаты наблюдений на частоте 37,5 ГГц (длина волны ~8 мм) в диапазоне следующих условий: вертикальный угол наблюдения 30 – 80 градусов, температура воды 12,5 – 25°C и скорость ветра 3 – 13 м/с.

Используя формулы можно рассчитать угловую зависимость приращения яркостной температуры от приращения скорости ветра $\partial T_B(\theta, W, T_{0,MI}) / \partial W$ при заданных значениях температуры воды и интервала скорости ветра, радиометрический контраст $\Delta T_B(\theta, W, T_{0,MI})$ и радиометрическую температуру $T_B(\theta, W, T_{0,MI})$. Результаты экспериментальных наблюдений и достаточное количество публикаций как зарубежных, так и отечественных свидетельствуют о том, что при скоростях ветра менее 2-3 м/с радиометрические приборы либо не чувствительны к изменению восходящего излучения, либо этого изменения не происходит и, следовательно, можно вычислять контраст, начиная со скоростей ветра в 2 или 3 м/с. При скоростях ветра менее 2 м/с в данной модели $\partial T_B(\theta, W, T_{0,MI}) / \partial W = 0$ и $\Delta T_B(\theta, W, T_{0,MI}) = 0$.

Дополнение модели MIROSE-а (анизотропия) описывает результаты наблюдений азимутальной анизотропии на вертикальной и горизонтальной поляризациях при частоте 37,5 ГГц в диапазоне следующих условий: вертикальный угол наблюдения 0 – 65 градусов и скорость ветра 0 – 20 м/с.

Используя формулы можно рассчитать азимутальную зависимость приращения яркостной температуры $\Delta T_{p, \Delta \phi}(W, \theta)$ при заданных значениях скорости ветра и вертикального угла наблюдения.

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