Моделирование микроволнового излучения взволнованной морской поверхности на основе экспериментальных данных

Д.С. Сазонов

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: sazonov 33m7@mail.ru

В настоящей работе представлена модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности MiROSE (Microwave Rough Ocean Surface Emission model), разработанная на основе экспериментальных исследований собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности на частоте 37,5 ГГц (длина волны ~8 мм). Экспериментальные данные получены на океанографической платформе в Черном море близ пос. Кацивели. Для разработанной модели использованы данные, полученные в ходе экспериментов 2005 и 2007 годов. Для проверки разработанной модели использованы данные эксперимента 2009 года. Модель MiROSE представляет собой функциональную зависимость крутизны радиационно-ветровой характеристики от вертикального угла наблюдения, интервала скорости ветра и температуры воды. На основе данной модели можно рассчитать радиояркостный контраст и радиояркостную температуру взволнованной водной поверхности. Представленная модель применима в диапазоне температуру воды от 12,5 до 25 °C, скоростей ветра 3–13 м/с и вертикальных углов наблюдения 30–80 градусов от надира. В работе проведено сравнение модели MiROSE с другими моделями, описывающими излучение взволнованной водной поверхности в микроволновом диапазоне длин волн.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиояркостная температура, радиояркостный контраст, моделирование, радиометр, микроволновое излучение, радиационно-ветровая зависимость, определение скорости ветра

Одобрена к печати: 17.04.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-271-287

Введение

Дистанционное зондирование поверхности океана с борта самолета или спутника неоспоримо является одним из наиболее эффективных способов наблюдения и исследования процессов и закономерностей, происходящих в нем. Огромный потенциал дистанционного зондирования в определении физических параметров системы «океан–атмосфера» привел к большому количеству исследований в данной области, проведению натурных измерений и моделированию физических процессов. Выполняемые исследования направлены на решение актуальных задач, связанных с прогнозированием погоды и стихийных бедствий, судоходством, климатическими исследованиями и другими научными и прикладными вопросами.

Среди средств дистанционного наблюдения стоит выделить микроволновую радиометрию. В данной области электромагнитного спектра восходящее излучение поверхности имеет относительно низкое поглощение в атмосфере и обладает высокой информативностью. Последнее обусловлено высокой степенью корреляции характеристик радиотеплового излучения с физико-химическими, диэлектрическими свойствами воды и в особенности с ее геометрией. А геометрия поверхности непосредственно связана с процессами, происходящими на границе раздела океана и атмосферы. Это, например, ветровое воздействие на поверхность. Таким образом, восходящее радиоизлучение океана несет в себе информацию о поверхностном волнении и, следовательно, о скорости и направлении приводного ветра. Уметь точно определять вектор приводного ветра в океане – очень важно, а проведение комплексных экспериментов *in situ* позволяют отрабатывать методики его определения в контролируемых метеоусловиях. На протяжении нескольких десятилетий 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, использующие при этом либо спектр морского волнения, либо набор аппроксимирующих функций. Однако результаты таких расчетов отличаются друг от друга и, как показано в работе (Сазонов и др., 2016), недостаточно адекватно описывают угловую зависимость восходящего излучения, полученную экспериментально.

Выше сказанное позволяет сделать вывод, что необходимо уметь рассчитывать собственное восходящее радиоизлучение водной поверхности в широком диапазоне углов наблюдения. Кроме того, составить модельную функцию можно только на основе качественного экспериментального материала. Поэтому целью настоящей работы является построение модели радиоизлучения взволнованной водной поверхности на основе детальных экспериментальных исследований.

1. Обзор эксперимента

В период с 2005 по 2016 год на океанографической платформе, принадлежащей федеральному государственному бюджетному учреждению науки «Черноморский гидрофизический полигон РАН» (ЧГП РАН), была проведена серия натурных исследований взаимодействия океана и атмосферы. Платформа расположена на южной оконечности полуострова Крым близ п. Кацивели, (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 метеоусловиях.

В ходе экспериментальных исследований с помощью микроволновых радиометрических приборов (радиометров) проводились измерения собственного восходящего излучения взволнованной водной поверхности (радиояркостной температуры) и нисходящего излучения атмосферы (Кузьмин и др., 2009). Также выполнялись и вспомогательные измерения, такие как фиксация метеопараметров, температуры воды (*табл. 1*), измерение волнения (волнографы ИКИ РАН и МГИ РАН) (Сазонов и др., 2014), фотосъемка состояния атмосферы и поверхности моря.

Радиометры были закреплены на поворотно-сканирующей платформе «Траверс», разработанной в ИКИ РАН. Это позволило измерить радиояркостную температуру на различных вертикальных и азимутальных углах наблюдения. Подробнее о выполненных экс-

периментах и использованном оборудовании можно узнать в работах (Кузьмин и др., 2009; Сазонов и др., 2016).

Период измерений	Температура воды на глубине 1 м, °С	Температура воздуха на высоте 21,5 м, °С	Максимальная скорость ветра, приведенная к высоте 10м, м/с	Минимальная скорость ветра, приведенная к высоте 10м, м/с		
2005 до апвеллинга	21	20,5	11	2		
2005 после апвеллинга	13	13 18		4		
2007	25	25,5	11	2,5		
2009	20,5	16	17	4,5		

Таблица 1. Основные метеопараметры

Далее в работе будут рассмотрены измерения, полученные с помощью радиометра-поляриметра РО8П с рабочей частотой 37,5 ГГц (длина волны ~8 мм). Прибор РО8П измеряет радиояркостную температуру на вертикальной (V), горизонтальной (H) поляризации, а также измеряет значение разности линейных поляризаций +45° и -45°. Ширина луча диаграммы направленности – 9 градусов по уровню половинной мощности, чувствительность – 0,15 К. Подробнее о приборе РО8П можно узнать в работе (Dzura et al., 1992).

В настоящей работе для создания модели использованы данные, полученные в ходе экспериментов 2005 и 2007 годов. Следует отметить, что во время эксперимента 2005 года прошел апвеллинг и температура воды изменилась, поэтому данные за 2005 год разделены на два периода: до апвеллинга и после. Данные, полученные в ходе эксперимента 2009 года, будут использованы для проверки разработанной модели. Сразу стоит оговорить, что в 2009 году было всего 7 рабочих дней и накоплено небольшое количество экспериментального материала, поэтому уровень достоверности статистических оценок за этот период невелик и данные не могут быть использованы для дополнения разработанной модели.

2. Изучаемое явление: крутизна радиационно-ветровой зависимости

Понятие радиояркостного контраста ΔT_{Br} , которое обычно используется для исследования зависимости собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности от скорости приводного ветра, определяется как разница радиояркостных температур взволнованной и гладкой водной поверхности (измеренных при одинаковых параметрах системы «океан–атмосфера»): $\Delta T_{Br} = T_{Br.Exp} - E T - R T_{Br.Atm}$, где $T_{Br.Exp} -$ радиояркостная температура водной поверхности, измеренная в эксперименте; R и E – коэффициенты отражения и излучения, рассчитываемые по формулам Френеля для термодинамической температуры воды T_s ; $T_{Br.Atm}$ – радиояркостная температура атмосферы и $T_{Br.SS}$ – излучение гладкой водной поверхности.

Известно, что случаи абсолютного штиля (гладкая водная поверхность) крайне редки и поэтому выполнить измерения морской поверхности в таких условиях практически невозможно. Радиояркостную температуру гладкой водной поверхности $T_{Br.SS}$ обычно заменяют теоретическим расчетом на основе физической модели излучения (см. Шарков, 2014). При модельных расчетах $T_{Br.SS}$ большое значение имеет способ учета переотражения излучения атмосферы (Садовский, 2015) и выбор модели диэлектрической проницаемости (Садовский и др., 2014). Поэтому использование модельных расчетов в процессе обработки экспериментальных данных влечет за собой снижение качества экспериментального материала. И, как следствие, все неточности и погрешности моделирования могут привести к кардинальным изменениям в получаемых результатах и их толковании.

Намного реже, чем радиояркостный контраст ΔT_{Br} используют приращение радиояркостной температуры от приращения скорости ветра $\partial W_{Br} / \partial W$, где ∂W – изменение скорости приводного ветра, которое в данной работе равно 1 м/с. Величина $\partial W_{Br} / \partial W$ является производной радиояркостной температуры по скорости ветра и характеризует чувствительность изменения радиоизлучения от ветрового воздействия на поверхность (также ее называют радиационно-ветровой зависимостью). Эта величина, как и исходные радиояркостные температуры, обладает частотной и поляризационной зависимостью и является функцией от вертикального угла наблюдения.

В случае наземного эксперимента радиационно-ветровая зависимость может быть описана следующим образом: $\partial T_{Br} / \partial W = T_{Br.Exp}(W + \Delta W) - T_{Br.Exp}(W)$. Преобразуем данное выражение, используя формулу для радиояркостного контраста: $\partial T_{Br} / \partial W = \Delta T_{Br}(W + \Delta W) + E T_{Br.SS} + R T_{Br.Atm} - \Delta T_{Br}(W) - E T_{Br.SS} - R T_{Br.Atm}$. Сократив подобные слагаемые, получим: $\partial T_{Br} / \partial W = \Delta T_{Br}(W + \Delta W) - \Delta T_{Br}(W)$.

Из представленной формулы можно сделать следующие выводы:

– При вычислении величины $\partial W_{Br} / \partial W$ из экспериментальных данных, полученных в схожих метеоусловиях (обычно в одном эксперименте с небольшим временным расхождением) компоненты, связанные с излучением гладкой водной поверхности и с зеркальным отражением атмосферы, сокращаются, тем самым не нужно рассчитывать коэффициенты отражения *R* и излучения *E*.

– Радиояркостный контраст ΔT_{Br} включает в себя излучение водной поверхности и неучтенный остаток переотражения атмосферы на не зеркальных углах наблюдения, связанный с ветровым воздействием на поверхность. При вычислении величины $\partial W_{Br} / \partial W$ остается приращение излучения водной поверхности и приращение неучтенного остатка переотражения атмосферы. По мнению автора настоящей работы, остаток переотражения атмосферы можно считать малым и величина угловой зависимости $\partial W_{Br} / \partial W$ связана только с изменением состояния поверхности и не зависит от излучения атмосферы.

Интервал скоростей ветра, на котором анализируется $\partial W_{Br} / \partial W$, определяется как: W_0 – начало интервала, $W_0 + \Delta W$ – конец интервала. Например, $W_0 = 4$ м/с, тогда $W_0 + \Delta W = 5$ м/с и интервал скоростей ветра равен 4–5 м/с. Следовательно, $\frac{\partial T_{Br}}{\partial W}\Big|_{4-5m/c}$ означает, что изучается приращение радиояркостной температуры при приращении скорости ветра с 4 до 5 м/с. Для упрощения моделирования и отображения информации в графическом виде интервал скоростей ветра (W_0 ; $W_0 + \Delta W$) будет записываться одним числом, обозначающим центр интервала, то есть $W_c = W_0 + \Delta W / 2$. Таким образом, интервал скоростей ветра, равный 4–5 м/с, будет записан как интервал скоростей ветра с центром 4,5 м/с (или интервал 4,5 м/с).

3. Моделирование

Анализ ∂T_{Br} / ∂W , выполненный в работах (Сазонов и др., 2016; Сазонов, 2017), показал, что среди известных моделей, выбранных для анализа, нет ни одной, адекватно описывающей поведение радиационно-ветровой зависимости в полном диапазоне исследуемых углов наблюдения и скоростей ветра. Кроме того, дополнительный корреляционный анализ (Сазонов, 2017) показал, что существует значимая корреляция между экспериментальными и модельными данными. 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; 3) моделирование температурной зависимости.

С целью упрощения моделирования и введения безразмерных переменных выполняется нормирование переменных (угла наблюдения, интервала скорости ветра и температуры воды). Формулы для преобразования имеют следующий вид:

$$x^{0} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2} ,$$
 (1)

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2},\tag{2}$$

где Δx – интервал варьирования по оси x, x^0 – центр новой системы. Переход от координат $x_1, x_2, ..., x_n$ к новой безразмерной системе координат $\hat{x}_1, \hat{x}_2, ..., \hat{x}_n$ осуществляется линейным преобразованием координат:

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - x^0}{\Delta x}, \quad i = 1...n,$$
(3)

где n – количество значений переменной x. В нормированном виде верхний уровень равен +1, нижний уровень равен –1 (–1 $\leq \hat{x}_i \leq 1$), координаты центра равны нулю и совпадают с началом координат безразмерной системы. Обратный переход выполняется по формуле $x_i = \hat{x}_i \Delta x + x^0$. В *табл. 2* приведены максимальные и минимальные значения переменных (угла наблюдения, интервала скорости ветра и температуры воды), а также их нормировочные коэффициенты.

Переменная	Максимум	Минимум	Интервал варьирования Дх по оси х	Центр новой системы х ^о	
Угол наблюдения, градусы	80	30	25	55	
Интервал скоро- сти ветра, м/с	2,5	12,5	5	7,5	
Температура воды, °С	12,5	25	6,25	18,75	

Таблица 2. Нормировочные коэффициенты для переменных модели

3.1. Угловая зависимость

На *рис. 1* представлена угловая зависимость приращения яркостной температуры от приращения скорости ветра ($\partial T_{Br} / \partial W$) для частоты в 37,5 ГГц в интервале скорости ветра 4–5 м/с. На основе полученных экспериментальных зависимостей подобраны аппроксимации, которые с высокой корреляцией описывают имеющиеся данные. Ход зависимости на *рис. 16* имеет нелинейный характер, поэтому было принято решение аппроксимировать экспериментальные данные полиномом. Выполнив серию аппроксимаций, используя полиномы разных степеней, было установлено, что для горизонтальной поляризации данные описываются полиномом третьей степени с коэффициентом корреляции r = 0,96 и увеличение степени полинома не приводит к значительному увеличению r. Для вертикальной поляризации экспериментальные данные описываются полиномом второй степени с r = 0,96. Таким образом, для вертикальной поляризации оптимальной аппроксимирующей функцией стал полином второго порядка (4), а для горизонтальной поляризации – полином третьего порядка (5):

$$\frac{\partial T_V(\theta_N)}{\partial W} = \sum_{i=0}^2 \theta_N^i \alpha_i^V, \qquad (4)$$

$$\frac{\partial T_H(\theta_N)}{\partial W} = \sum_{i=0}^3 \theta_N^i \alpha_i^H, \qquad (5)$$

где *i* – номер члена полинома; α_i^p – коэффициент полинома угловой зависимости; *p* – поляризация (*V* или *H*); θ_N – вертикальный угол наблюдения в нормированной системе координат. Графики на *puc. 1* выполнены в исходной системе координат. Все полученные коэффициенты полиномов (4) и (5) приведены на *puc. 2* как зависимость от интервала скорости ветра.



Рис. 1. Экспериментально полученные значения крутизны радиационно-ветровой зависимости на различных углах наблюдения в интервале скорости ветра 4-5 м/с в эксперименте 2005 года: а) вертикальная поляризация; б) горизонтальная поляризация. Доверительный интервал построен для уровня достоверности 0,9

3.2. Ветровая зависимость

На графиках (*puc. 2*) прослеживается достаточно четкая зависимость коэффициентов α_i^p от интервала скорости ветра *Wc*. Предполагая, что зависимость линейна, выполнена аппроксимация коэффициентов α_i^p линейной функцией (6) вида:

$$\alpha_i^p(Wc_N) = \delta_0^p + Wc_N \,\delta_1^p,\tag{6}$$

где δ_i^p – коэффициент полинома ветровой зависимости, Wc_N – коэффициент интервала скорости ветра в нормированной системе координат. Полученные коэффициенты приведены на *рис. 3* как зависимость от температуры воды в исходной системе координат.

3.3. Температурная зависимость

Полученные в предыдущем разделе коэффициенты ветровой зависимости δ_i^p для трех экспериментальных периодов построены как зависимость от температуры воды. Эти графики приведены на *puc. 3*.

Как для вертикальной (*puc. 3a*), так и для горизонтальной (*puc. 3б*) поляризаций прослеживается четкая линейная зависимость коэффициентов δ_i^p от температуры только в некоторых случаях: например, графики для коэффициентов $\alpha_0^V - \delta_0$ и $\alpha_1^H - \delta_1$. Также

наблюдается зависимость, близкая к линейной, для коэффициентов $\alpha_2^{\nu} - \delta_1$ и $\alpha_0^{H} - \delta_0$. В остальных случаях, по трем точкам сложно сказать, имеет ли место линейная или нелинейная зависимость, поэтому было принято решение аппроксимировать все коэффициенты δ_i^p линейной функцией:

$$\delta_i^p(Te_N) = \gamma_0^p + \gamma_1^p Te_N, \tag{7}$$

где γ_i^p – коэффициенты температурной зависимости (*табл. 3*); *Тв_N* – температура воды в нормированной системе координат.



Рис. 2а. Коэффициенты полинома (точки) угловой зависимости как функция от интервала скорости ветра и их аппроксимация: вертикальная поляризация



Рис. 26. Коэффициенты полинома (точки) угловой зависимости как функция от интервала скорости ветра и их аппроксимация: горизонтальная поляризация



Рис. 3. Коэффициенты полинома (точки) ветровой зависимости как функции от температуры воды и их аппроксимация: а) вертикальная поляризация, б) горизонтальная поляризация

	Коэффициент $oldsymbol{lpha}_0^V$				Коэффициент $\alpha_1^{\scriptscriptstyle V}$			Коэффициент $\alpha_2^{\scriptscriptstyle V}$					
	γ ₀ γ		7 1	γ ₀		γ_1		γ ₀		γ ₁			
δ	0,159		0,0)93		-1,344	0,121		-0,767		0,086		
δ_1	0,244		0,0)55		0,749	-0,113 (0,7	,764		0,105	
	Коэффициент $lpha_0^H$ Коэф		Коэф	фициент $lpha_1^H$ Коэффиц		иен	иент $\alpha_2^{\scriptscriptstyle H}$ Коэф		фициент α_3^H				
	γ_0		γ_1	γ_0		γ_1	γ_0		γ_1	γ_0		γ_1	
δ	1,318	-	0,183	0,11	1	-0,344	-1,046	(),247	,247 -0,85		0,506	
δ_1	-0,553	(),149	-1,16	6	-0,327	1,589	-1	0,178	2,399)	0,202	

Таблица 3. Коэффициенты температурной зависимости



Рис. 4. Сравнение экспериментально полученных данных с исходной аппроксимацией полиномами (4) и (5) и моделью MiROSE в интервале скорости ветра 4-5 м/с: а) вертикальная поляризация; б) горизонтальная поляризация

3.4. Модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности

Предлагаемая модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности MiROSE (Microwave Rough Ocean Surface Emission model) описывает результаты наблюдений в диапазоне следующих условий: вертикальный угол наблюдения 30–80 градусов, температура воды 12,5–25 °C и скорость ветра 3–13 м/с. На *рис. 4* представлено сравнение экспериментально полученных данных с исходной аппроксимацией полиномами по формулам (4) и (5) и моделью MiROSE.

Используя формулы (4–7), можно рассчитать: угловую зависимость приращения яркостной температуры от приращения скорости ветра $\partial T_{Br}(\theta)/\partial W$ при заданных значениях температуры воды и интервала скорости ветра; радиояркостный контраст $\Delta T_{Br}(\theta)$ и радиояркостную температуру $T_{Br}(\theta)$. Радиояркостный контраст вычисляется как $\Delta T_{Br}(\theta) = \sum_{i=2.5}^{n} \partial T_{Br}(\theta)/\partial W_i$, где *i* – интервал скорости ветра, *n* равно 2,5–12,5 м/с. 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 $\partial T_{Br}(\theta)/\partial W = 0$ и $\Delta T_{Br}(\theta) = 0$. Радиояркостная температура вычисляется как $T_{Br}(\theta) = T_{Br,SS}(\theta) + \Delta T_{Br}(\theta)$.

4. Сравнение модели с экспериментальными данными 2009 года

На *рис.* 5 представлены графики сравнения экспериментальных данных, полученных в эксперименте 2009 года, с разработанной моделью MiROSE. Представленные графики наглядно демонстрируют сходство между экспериментом и расчетом. Предлагаемая модель повторяет угловую зависимость и находится внутри доверительного интервала.

Чтобы сравнение было полным, рассчитаны коэффициенты корреляции r и значения функции невязки $\xi = \sum_{i} (x_i - y_i)^2$ (где i – вертикальный угол наблюдения) между экспериментом и моделью. Сформулированы гипотезы: гипотеза H0, говорящая об отсутствии корреляции между экспериментальными данными и модельными расчетами, и гипотеза H1, говорящая о существовании статистически значимой корреляции (Бендат, Пирсол, 1989). После необходимых вычислений было получено, что при уровне достоверности $\alpha = 5\%$ принимается гипотеза H0, если $r \le 0,281$, и принимается гипотеза H1, если r > 0,281, и чем дальше значение r от границы, тем сильнее корреляция. На *рис. 6, 7* представлены рассчитанные значения коэффициента корреляции и невязки.

Из графика на *рис. 6* можно сделать вывод о наличии значимой корреляции между значениями крутизны радиационно-ветровой зависимости, полученными по данным 2009 года, и разработанной моделью. Наибольшая корреляция соответствует интервалу скорости ветра 7–8 м/с для вертикальной поляризации и интервалу 9–10 м/с для горизонтальной поляризации. Анализ невязок для интервалов скоростей ветра 6–7, 7–8 и 8–9 м/с показывает, что модель 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 достаточно высокой точностью описывает поведение радиационно-ветровой зависимости, что наглядно отображено на *рис. 5*.

5. Сравнение модели MiROSE с другими моделями

С целью сравнения разработанной модели MiROSE с другими моделями используется радиояркостный контраст ΔT_{Br} . При проведении расчетов ΔT_{Br} в рамках двухмасштабной модели волнения использовались модели спектра гравитационно-капиллярных волн, далее, модель A (Apel, 1994), модель E (Elfouhaily et al., 1997) и модель D (Durden, Vesecky, 1985). Также расчеты были проведены по полуэмпирической модели ветрового волнения – MW (Meissner, Wentz, 2012). На *рис. 8a, б* представлены угловые зависимости радиояркостных контрастов для скорости ветра 7 м/с и температуры воды 13 °C.

В результате сравнения разработанной модели с другими при скорости ветра от 3 до 13 м/с и температуре воды 12,5–25 °С можно отметить следующее: на вертикальной



Рис. 5. Сравнение экспериментально полученных данных 2009 года с моделью MiROSE в интервале скорости ветра 7-8 м/с: а) вертикальная поляризация; б) горизонтальная поляризация



Рис. 6. Коэффициент корреляции между экспериментальными данными 2009 года и моделью MiROSE. Точки – вертикальная поляризация, кресты – горизонтальная поляризация, прямая линия – уровень 0,281

Рис. 7. Значения функции невязки между экспериментальными данными 2009 года и моделью MiROSE. Точки – вертикальная поляризация, кресты – горизонтальная поляризация

поляризации угловая зависимость разработанной модели аналогична другим. Общим для всех является переход величины радиояркостного контраста через ноль в диапазоне вертикальных углов наблюдения 50–60 градусов, что говорит в пользу физичности разработанной модели. В диапазоне углов от 30 до 50–55 градусов расхождения между моделями



Рис. 8. Сравнение радиояркостных контрастов, рассчитанных по различным моделям. Скорость ветра 7 м/с, температура воды 13 °С; а) вертикальная поляризация, б) горизонтальная поляризация

достигает от 2 К при скорости ветра 3 м/с до 8 К при 12 м/с. Также качественный анализ зависимостей показал, что разработанная модель наиболее блика к модели MW.

На горизонтальной поляризации результаты сравнения показали, что угловая зависимость разработанной модели похожа на другие, кроме модели МW, которая монотонно возрастает в рассматриваемом интервале углов наблюдения. Расхождения между моделям достигают 20 К при скорости ветра 3 м/с и 25 К при 12 м/с. Разработанная модель наиболее близка к модели Е (расхождения не превышают 10 К). Еще одна отличительная особенность новой модели – это угол максимальной чувствительности к скорости ветра, который для моделей А, D и E составляет, ~65 градусов, а для новой модели – ~60 градусов. Данный факт интересен и требует дальнейшего исследования. Интересным является и то, что модель MW, построенная по спутниковым измерениям на значительных пространственных и временных масштабах, не отображает наличия сильной зависимости излучения на горизонтальной поляризации от интенсивности ветрового воздействия, в отличие от остальных моделей и экспериментальных наблюдений.

На *рис.* 9 представлены рассчитанные по новой модели угловые зависимости радиояркостных контрастов для скоростей ветра 3–13 м/с и температуры воды 21 °C. Графики радиояркостных контрастов наглядно демонстрируют известные явления: во-первых, увеличение интенсивности излучения при увеличении скорости ветра; во-вторых, независимость излучения водной поверхности от ветрового воздействия на вертикальной поляризации для углов в диапазоне 50–60 градусов; в-третьих, сильную чувствительность горизонтально поляризованного излучения к скорости ветра при углах наблюдения 55–65 градусов.



Рис. 9. Радиояркостный контраст рассчитанный по модели MiROSE. Температура воды 21 °C; а) вертикальная поляризация, б) горизонтальная поляризация

Заключение

В настоящей работе разработана модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности (MiROSE). С помощью разработанной модели можно рассчитать радиационно-ветровую зависимость, радиояркостный контраст и радиояркостную температуру. Сравнения показали, что предлагаемая модель адекватно описывает экспериментальные данные и сравнима с результатами расчетов по другим моделям в диапазоне температур воды от 12,5 до 25 °C, скоростей ветра 3–13 м/с и вертикальных углов наблюдения 30–80 градусов от надира.

Предлагаемая модель в настоящее время находится на начальном этапе разработки, но демонстрирует большой потенциал. Модель MiROSE будет протестирована и использована для определения скорости ветра в экспериментальных исследованиях. Определенная скорость ветра будет использована при решении ряда задач, связанных с исследованием процессов взаимодействия системы «океан–атмосфера», методами микроволновой радиометрии.

С целью улучшения модели MiROSE необходимо провести дополнительные исследования: во-первых, выполнить измерения излучения водной поверхности в широком диапазоне температур воды от 0 до 30 °C и более; во-вторых, выполнить измерения в надир и около него; в-третьих, выполнить измерения при штормовых ветрах 20 м/с и более; в-четвертых, выполнить измерения на разных частотах в микроволновой области.

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

Литература

- 1. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 540 с.
- Беноит Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. пер. с англ. М., Мир, 1967. 546 с.
 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 Черном море // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 1. С. 31–44.
- 3. Садовский И.Н., Шарков Е.А., Кузьмин А.В., Сазонов Д.С., Пашинов Е.В. Обзор моделей комплексной диэлектрической проницаемости водной среды, применяемых в практике дистанционного зондирования // Исслед. земли из космоса. 2014. № 6. С. 79–92.
- Садовский И.Н. Сравнение вариантов учета атмосферы при проведении подспутниковых радиополяриметрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 190–199.
 Сазонов Д.С., Дулов В.А., Садовский И.Н., Чечина Е.В., Кузьмин А.В. Подспутниковые измерения асимме-
- 5. *Сазонов Д.С., Дулов В.А., Садовский И.Н., Чечина Е.В., Кузьмин А.В.* Подспутниковые измерения асимметрии уклонов ветровых волн гравитационного диапазона // Украинский метрологический журнал. 2014. № 1. С. 54–58.
- 6. Сазонов Д.С., Кузьмин А.В., Садовский И.Н. Экспериментальные исследования зависимости интенсивности радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности от скорости приводного ветра // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 25–34.
- 7. Сазонов Д.С. Корреляционный анализ экспериментальных дистанционных измерений и моделей микроволнового излучения взволнованной водной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 3 (в печати).
- 8. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование земли: Физические основы. в 2 т. М.: ИКИ РАН. 2014. Т. 1. 544 с.
- 9. *Apel J.R.* An improved ocean surface wave vector spectrum // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. No. C8. P. 16.269–16.291.
- 10. 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. Vol. OE-10. No. 4. P. 445–451.
- Dzura M.S., Etkin V.S., Khrupin A.S., Pospelov M.N., Raev M.D. Radiometers-Polarimeters: Principles of Design and Applications for Sea Surface Microwave Emission Polarimetry // Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'92) Digest, Houston, TX, USA. 1992. Vol. 2. P. 1432–1434.
- Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D. A unified directional spectrum for long and short winddriven waves // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. No. 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. Vol. 50. No. 8. P. 3004– 3026.

Simulation of rough sea surface microwave emission on the basis of experimental data

D.S. Sazonov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: sazonov 33m7@mail.ru

In this paper, the MiROSE model (Microwave Rough Ocean Surface Emission model) of microwave rough water surface emission is developed. This model is based on experimental studies of rough water surface emission at a frequency of 37.5 GHz (wavelength \sim 8 mm). Experimental data were obtained on the oceanographic platform in the Black Sea near the Katsiveli settlement. To develop the model, the data obtained during experiments in 2005 and 2007 were used. The 2009 experiment data were used to test the developed model. MiROSE represents the functional dependence of the wind speed sensitivity of brightness temperature on incidence angle, wind speed and temperature range. Using this model the brightness contrast and brightness temperature of rough water surface can be calculated. The model is applicable for water temperatures of 12.5 to 25 °C, wind velocities of 3 to 13 m/s and incidence angles of 30 to 80 degrees from nadir. A comparison of MiROSE with other models of rough water surface emission in the microwave range is presented.

Keywords: remote sensing, brightness temperature, brightness contrast, modeling, radiometer, microwave emission, angle dependence of wind speed sensitivity, wind speed retrieval

Accepted: 17.04.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-271-287

References

- Bendat J.S., Piersol A.G., Random data analysis and measurement procedures, Moscow: Mir, 1989, 540 p. 1.
- Kuzmin A.V., Goryachkin Yu.A., Ermakov D.M., Ermakov S.A., Komarova N.Yu., Kuznetsov A.S., Repina I.A., 2 Sadovskii I.N., Smirnov M.T., Sharkov E.A., Chukharev A.M., Morskaya gidrofizicheskaya platforma "Katsiveli" kak podsputnikovyi poligon na Chernom more (Marine Hydrophysical platform "Katsiveli" as a subsatellite test site on the Black Sea), Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2009, No. 1, pp. 31-44.
- Sadovskii I.N., Sharkov E.A., Kuzmin A.V., Sazonov D.S., Pashinov E.V., Obzor modelei kompleksnoi dielektricheskoi pronitsaemosti vodnoi sredy, primenyaemykh v praktike distantsionnogo zondirovaniya (The 3 review of permittivity models of the aqueous medium, used in the practice of remote sensing), Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2014, No. 6, pp. 79-92.
- 4. Sadovskii I.N., Sravnenie variantov ucheta atmosfery pri provedenii podsputnikovykh radiopolyarimetricheskikh izmerenii (Comparison of methods to assess atmosphere radiation impact on ground-based radio-polarimetric measurements), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 190-199
- Sazonov D.S., Dulov V.A., Sadovskii I.N., Chechina E.V., Kuzmin A.V., Podsputnikovye izmereniya asimmetrii uklonov vetrovykh voln gravitatsionnogo diapazona (Subsatellite measurements of slope asymmetry of 5 gravitational wind waves), Ukrainskii metrologicheskii zhurnal, 2014, No. 1, pp. 54–58.
- 6. Sazonov D.S., Kuz'min A.V., Sadovskii I.N., Eksperimental'nye issledovaniya zavisimosti intensivnosti radioteplovogo izlucheniya vzvolnovannoi morskoi poverkhnosti ot skorosti privodnogo vetra (Experimental Study of Thermal Radiation, Depending on the Water Surface Wind Speed), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 1–2, pp. 25–34.
- Sazonov D.S., Korrelyatsionnyi analiz eksperimental'nykh distantsionnykh izmerenii i modelei mikrovolnovogo 7. izlucheniya vzvolnovannoi vodnoi poverkhnosti (Correlation analysis of experimental remote measurements and models of microwave radiation of rough water surface), Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2017, No. 3 (in print)
- 8. Sharkov E.A., Radioteplovoe distantsionnoe zondirovanie zemli: Fizicheskie osnovy: v 2 t. (Radiothermal Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations: in 2 v.), Moscow: IKI RAS, 2014, Vol. 1, 544 p. Apel J.R., An improved ocean surface wave vector spectrum, *J. Geophys. Res.*, 1994, Vol. 99, No. S8, pp. 16.269–
- 9 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, Vol. OE-10, No. 4, pp. 445–451.
 Dzura M.S., Etkin V.S., Khrupin A.S., Pospelov M.N., Raev M.D., Radiometers-Polarimeters: Principles of
- Design and Applications for Sea Surface Microwave Emission Polarimetry, Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS '92), Digest, Houston, TX, USA, 1992, Vol. 2, pp. 1432-1434.
- Elfouhaily T., Chapron V., Katsaros K., Vandemark D., A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves, J. Geophys. Res., 1997, Vol. 102, No. S7, pp. 15.781–15.796. 12
- 13. 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, Vol. 50, No. 8, pp. 3004–3026.