

Использование моделей развитого волнения в радиофизических расчетах

М.В. Данилычев

Институт радиотехники и электроники Российской Академии Наук, 125009, Россия, Москва, ул. Моховая, 11/7, e-mail: dan496@yandex.ru

Рассматриваются существующие методики расчета СВЧ- радиационных характеристик системы “океан-атмосфера”. Обсуждается возможность использования в этих целях эмпирических зависимостей, характерных для случая развитого морского волнения. Приводятся данные совместного анализа волнографических и радиометрических данных ряда экспериментов по бистатическому зондированию морской поверхности, в котором Солнце использовалось как мощный природный источник зондирующего СВЧ- радиоизлучения.

Some existing methods of calculations of the microwave radiation characteristics of the “ocean-atmosphere” system are being considered. The application of empirical dependencies which are typical for developed wind-induced sea roughness is being discussed. There is a joint analysis of wave recording and radiation data which have been received during previous experiment of bistatic sea surface sensing with the Sun as a natural source of probing radio signal. As a result the existing methodology of theoretical calculations have been checked and noticeably increased.

В настоящее время для вычисления СВЧ-радиационных характеристик водной поверхности используются различные методики расчета. Основное отличие между ними заключается в том, как учитываются при моделировании особенности строения поверхностного слоя воды и приводного слоя атмосферы [1-3]. Особое значение имеет задача аккуратного учета влияния поверхностного волнения с его шероховатостью и пенным покровом. Учет шероховатости, как правило, осуществляется по моделям квазизеркального рассеяния на крупных волновых площадках вблизи направления зеркального отражения к поверхности и различным моделям диффузного рассеяния на мелкомасштабных волновых структурах вдали от этого направления. Также используются различные комбинации этих методик. С этой точки зрения вполне естественными выглядят различия в методиках расчета для случая активной СВЧ радиолокации под наклонными углами и его пассивного аналога, т.е. СВЧ радиометрии морской поверхности [3-7]. Наиболее часто в современной радиометрии морской поверхности используется модифицированный тем или иным образом метод Кирхгофа (МК) [1-3]. В этом методе в расчет принимаются только “достаточно крупные” поверхностные волны, чьи размеры и кривизна удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} \Lambda &\gg \lambda \\ (2\pi/\lambda) \cdot R_c \cdot \cos^3 \theta &= k \cdot R_c \cdot \cos^3 \theta \gg 1 \end{aligned} \quad (1)$$

где Λ есть длина морской волны,

λ – длина волны зондирующего СВЧ излучения,

R_c – радиус кривизны локального волнового элемента,

k – модуль СВЧ волнового вектора и θ – надирный угол зондирования.

В процессе вычисления эти “большие и гладкие” волны аппроксимируются плоскими площадками с размерами много больше, чем длина используемой радиоволны λ . Локальные радиационные параметры, в зависимости от специфики выбранной модели, вычисляются по каноническим или модифицированным формулам Френеля. Конечный же результат достигается благодаря усреднению по всем

возможным уклонам. Понятно, что при таком подходе заведомо пренебрегают краевыми эффектами и вкладом тех поверхностных волн, чей размер существенно меньше или порядка λ . Такого рода мелкомасштабные волны отвечают за диффузное рассеяние во все стороны, но в целом их вклад пренебрежимо мал по сравнению с вкладом от крупных волн в области квазизеркального рассеяния вблизи направления зеркального отражения. И только вне этой области (приблизительно более $25\div 30^\circ$ от направления зеркального отражения) вклад мелкомасштабной составляющей начинает превалировать [3]. Для описания процессов рассеяния в области диффузного рассеяния обычно используется метод малых возмущений (ММВ), что означает, помимо ограничения на размер неровностей, еще и требование их пологости [1-3]:

$$\sigma_h/\lambda \ll 1 \quad \text{и} \quad \sigma_h/\Lambda \ll 1, \quad (2)$$

где σ_h - среднеквадратичное отклонение высот неровностей.

Иногда используется несколько иные формулировки этих ограничений, например:

$$\begin{cases} \sigma_h \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot \cos \theta = \sigma_h \cdot k \cdot \cos \theta \ll 1 \\ \sigma_h / l_h \ll 1 \end{cases} \quad (2a)$$

при этом под характерным продольным размером неровностей l_h здесь понимают величину Λ , $\Lambda/2$ или близкий по значению радиус поверхностной корреляции этих мелкомасштабных неровностей [1-3]. Принципиальным моментом при практическом применении как вариантов метода Кирхгофа, так и его двухмасштабных аналогов [2,3] является конкретное количественное определение теоретических соотношений типа (1) и (2). В частности, не существует никакого общего представления о том, какое же волновое число $K^{up} = 2\pi/\Lambda_{\min}$ должно ограничивать сверху длинноволновую фракцию реального спектра уклонов морских волн [2-7]. Для того чтобы обойти этот критический момент на практике используют эмпирические зависимости распределения уклонов крупных морских волн. Такого рода зависимости известны для случая развитых ветровых волн [8-11]. Они были получены различными исследователями в процессе обработки статистических данных, собранных во время волновых измерений в различных районах Мирового океана. При этом выбор аппаратуры, методики измерения и экспериментальных критериев был сугубо индивидуален для каждого исследователя.

Расхождение полученных результатов оказалось достаточно большим. На первый взгляд оно может быть объяснено за счет учета аэро- и гидрологических особенностей конкретных акваторий. Однако существенные различия остаются и в том случае, когда измерения параметров поверхностного волнения проводились в одном и том же районе Мирового океана. К числу наиболее известных и цитируемых в литературе [1-14] следует отнести результаты Кокса-Манка (1951-55), Пирсона-Стейси (1973), Калинина-Лейкина (1974), Бурцева-Пелевина (1975), Бьёркаса-Риделя (1979) и Филлипса (1985). В качестве примера в таблице 1 приведены некоторые из этих результатов для случая развитого волнения в виде линейной аппроксимации экспериментальных данных по зависимости дисперсии уклонов крупных волн $\sigma_x^2(U_h)$ вдоль и $\sigma_y^2(U_h)$ поперек направления действия разгонного ветра от его величины U_h на высоте измерения h_v . Какие же зависимости брать для практических расчетов и как это делать?

Таблица 1. Экспериментальная зависимость дисперсии уклонов крупных морских волн от величины скорости ветра U_h на стандартной высоте измерения h_U для случая развитого ветрового волнения.

Исследователь и, район работ	Методика измерения и обработки	Сезон, время суток, диапазон значений скорости ветра	Дисперсия уклонов вдоль и поперёк направления приводного ветра
Кокс - Манк (1951-55), Тихий океан в районе Гавайских островов	Анализ статистики “солнечных бликов” на поверхности моря, полученной при аэрофотосъемке в оптическом диапазоне	Лето, время около полудня, скорость ветра на высоте $h_U = 12,5 \approx 13_m$ от 0.7 до 13.8 м/с	$\sigma_x^2(U_{13}) = 0.00316U_{13} \pm 0.004$ $\sigma_y^2(U_{13}) = 0.003 + 0.00192U_{13} \pm 0.002$ $\sigma_x^2(U_{13}) + \sigma_y^2(U_{13}) =$ $= 0.003 + 0.00512U_{13} \pm 0.004$
Бурцев - Пелевин (1975), прибрежный район Черного моря	Анализ статистики “световых бликов” на поверхности при равномерном искусственном освещении от точечного источника	Лето, ночное время, скорость ветра на высоте $h_U = 19.5 \approx 20_m$ в диапазоне от 2 до 7 м/с	$\sigma_x^2(U_{20}) = 0.00174 + 0.00157U_{20}$ $\sigma_y^2(U_{20}) = 0.00134 + 0.00120U_{20}$ $\sigma_x^2(U_{20}) + \sigma_y^2(U_{20}) =$ $= 0.0031 + 0.0028U_{20}$
Калинин - Лейкин (1974), Каспийское море, 27 км от берега	Непосредственные контактные измерения струнным волнографом с базой матрицы от 20 до 40 см	Осень, круглосуточно, скорость ветра от 6.6 до 14 м/с на высоте измерения $h_U = 10_m$	$\sigma_x^2(U_{10}) + \sigma_y^2(U_{10}) = 0.0021U_{10}$ $\langle \sigma_y^2(U_{10}) / \sigma_x^2(U_{10}) \rangle = 0.44$

Наиболее популярными до сих пор остаются канонические зависимости Кокса-Манка [8,9]. Вплоть до настоящего времени, многие теоретики стремятся использовать их в практически неизменном или слабо модифицированном виде. В качестве примера такого подхода можно привести известную модель QEMM/FASTEM, которая использует зависимости Кокса-Манка даже в своей современной 4-ой версии от 2011 года [3]. Вместе с тем, по мере развития микроволновой радиометрии уже было замечено, что прямое использование этих результатов, даже в случае развитого волнения, приводит к заметным расхождениям с данными эксперимента. Это было показано, например, в экспериментальной работе Холлингера, выполненной на борту океанографической платформы (Argus Island tower) в 1970-71 [12]. Впоследствии, Вилхайд [13] обобщил выводы Холлингера и применил его идею для обработки данных со спутников Numbus-6 и Seasat (диапазоны 6.6, 10.7, 18, 21 and 37 ГГц). Для этого он ввел полуэмпирическую функцию коррекции, которая позволила учитывать соотношения размеров волновых площадок и длины радиоволн [13]:

$$\begin{aligned} \sigma_r^2(f, V) &= \sigma_{cm}^2(V) \cdot C(f) = \sigma_{cm}^2(V) \cdot (0.3 + 0.02f), & \text{for } f \leq 35 \text{ ГГц} \\ \sigma_r^2(f, V) &= \sigma_{cm}^2(V), & \text{for } f \geq 35 \text{ ГГц} \end{aligned} \quad (3)$$

здесь f – частота зондирующих радиоволн в ГГц,

$\sigma_{cm}^2(V)$ – дисперсия уклонов крупных морских волн согласно модели Кокса-Манка в rad^2 ,

$\sigma_r^2(f, V)$ - дисперсия уклонов морских волн “достаточно крупных для излучения с частотой f ”.

При этом следует подчеркнуть, что непосредственного измерения параметров поля поверхностного волнения в экспериментах Холлингера и работах Вилхайта не проводилось, и, при измерении ветровой и волновой обстановки априори подразумевалась справедливость зависимостей Кокса- Манка [8,9]. Таким образом, в наиболее проработанных современных моделях использование информации о состоянии морского волнения стало базироваться на следующих допущениях:

- 1) Морское волнение в основном сформировано за счет развитых ветровых волн;
- 2) Зависимость дисперсии уклонов крупных поверхностных волн такого рода от величины скорости приводного ветра на стандартной высоте находится в согласии с каноническими результатами Кокса и Манка;
- 3) Переход от спектральной фракции поверхностных волн, “крупных согласно Коксу и Манку”, к фракции волн, “крупных по отношению к длине радиоволны λ (с радиочастотой f)” осуществляется по методике Холлингера - Вилхайта (3);
- 4) Влияние пенного покрова учитывается на основе данных лабораторного моделирования и общей статистики, собранной в конкретных сезонно- региональных условиях [3,13].

Эти допущения достаточно принципиальны при понимании и практическом использовании метода Кирхгофа в СВЧ- радиометрии морской поверхности. Естественно, при таком подходе представлялось совершенно необходимой экспериментальная проверка его базовых положений. В отличие от ранних экспериментов Холлингера и Вилхайта, в настоящее время у нас уже имеются данные одновременного измерения радиационных характеристик взволнованной морской поверхности и параметров поля шероховатости, например, в диапазоне от 3 до 50 ГГц [15] и в L-диапазоне около частоты 1.42 ГГц [17].

В 1989-90 гг. в рамках подготовки программы подспутниковых экспериментов по проекту “Природа” были выполнены эксперименты по бистатической локации взволнованной поверхности моря [15]. При этом в качестве источника зондирующего шумового СВЧ- радиоизлучения выступало Солнце, а основной объем данных по рассеянию в квазизеркальной области был собран на длинах волн 0.8 см (37.5 ГГц), 2.25 см (13.33 ГГц) и 6.0 см (5.0 ГГц) обеих поляризаций. Эти эксперименты были выполнены в акватории Черного моря в весенний и осенний сезоны 1989г, а также летний сезон 1990г. Аппаратурный комплекс был развернут на борту морской исследовательской платформы, принадлежащей Экспериментальному Отделению Морского Гидрофизического Института (пос. Качивели, Крым). В ходе работ, проводилось непосредственное измерение параметров потока микроволнового излучения солнечного происхождения после его рассеяния на шероховатостях взволнованной поверхности моря. Помимо этого, выполнялись: 1) контроль спектральных уровней нисходящего потока солнечного излучения в исследуемых диапазонах (сквозь атмосферу), 2) контроль состояния нижнего слоя атмосферы и поверхностного слоя воды, 3) непосредственные контактные измерения поля поверхностных шероховатостей. За время экспедиций был выполнен большой объем волнографических и радиометрических исследований. С точки зрения развития существующих радиационно-ветровых моделей наиболее интересными, являются, конечно, результаты совместных радиофизических и гидрофизических измерений, которые проводились на одном и том же участке поверхности практически одновременно. В таких экспериментах одновременно измерялись: 1) вклад в измеряемую антенную температуру отраженного СВЧ- радиоизлучения Солнца на вертикальной и горизонтальной поляризациях; 2) скорость и направление ветра на

стандартной высоте 19.5 м; 3) дисперсии уклонов вдоль и поперек направления разгонного ветра (или зыби); 4) температура, влажность и давление приземного слоя атмосферы, а также температура верхнего слоя воды на глубине 1 м. Анализ физических, геометрических и временных характеристик исследуемого процесса подтвердил возможность выделения подсвета от рассеянного солнечного излучения на фоне собственного излучения системы “океан- атмосфера” путем использования режима “солнечная дорожка”. В этом режиме при “почти фиксированном” положении Солнца осуществлялось выделение подсвета от Солнца методом азимутального сканирования при пошаговом изменении зенитного угла приемной антенны [15]. В процессе работ было накоплено большое количество данных по статистике уклонов крупных морских волн, что позволило провести полноценный статистический анализ. Стационарная исследовательская платформа, ныне принадлежащая ЭО МГИ РАН, находится вблизи южного побережья Крымского полуострова в районе поселков Качивели и Симеиз. Удаление от берега в сторону открытого моря составляет приблизительно 800 м, глубина водной толщи около 30 м. Близость береговой черты означает необходимость считаться с возможным наличием нетипичного для случая открытого моря поверхностного волнения при реализации коротких ветровых разгонов со стороны берега. В целях приближения к условиям открытого моря в ходе экспериментов рассматривались только те ситуации, когда направление ветра и приходящей зыби было со стороны открытого моря на берег или параллельно береговой черте. В результате было обнаружено, что наличие одной или нескольких систем зыби наблюдается приблизительно в 60÷65% всех случаев, а ситуация собственно ветрового волнения наблюдается существенно реже – в остающихся 35÷40% всех случаев наблюдения. Причем это усредненное по всем периодам измерений соотношение остается приблизительно таким же и при усреднении внутри отдельных сезонных периодов измерений. Сравнение полученных результатов с имеющимся массивом океанологических данных, полученных другими исследователями для случая открытого океана, дает неожиданно хорошее совпадение в этой части общей статистики волнения [2,14]. Например, канонические результаты Московитца [14] для открытого океана получены путем тщательного анализа обширного массива волнографических данных, добытых с кораблей погоды в Атлантике. Они также свидетельствуют о том, что доля чисто ветрового волнения в условиях открытого океана не превышает 42-45% во все сезоны. Таким образом, можно считать, что наша экспериментальная модель достаточно хорошо приближает условия открытого моря. На рис.1 приводится пример реальной, довольно простой и, вместе с тем, весьма показательной ситуации с эволюцией волновой обстановки во времени. В начальной фазе процесса волнение постепенно эволюционирует вслед за нарастанием скорости разгонного ветра от первичных 7 м/с до 12.5 м/с. Затем “раскачка” волнения продолжается, несмотря на прекращение роста скорости разгонного ветра и даже его постепенное затухание вплоть до величины в 6 м/с. Третья фаза отражает картину последующей постепенной диссипации волновой энергии на фоне затухания силы ветра до 1 м/с. И, наконец, заключительная фаза свидетельствует о продолжающемся снижении и постепенном возврате к практически равновесным значениям дисперсии уклонов, соответствующим силе ветра, выросшей снова до 7 м/с, что совпадает с начальными условиями. Временной интервал между точками на графиках составляет около 50 мин, ветер измерялся на высоте 19.5 м.

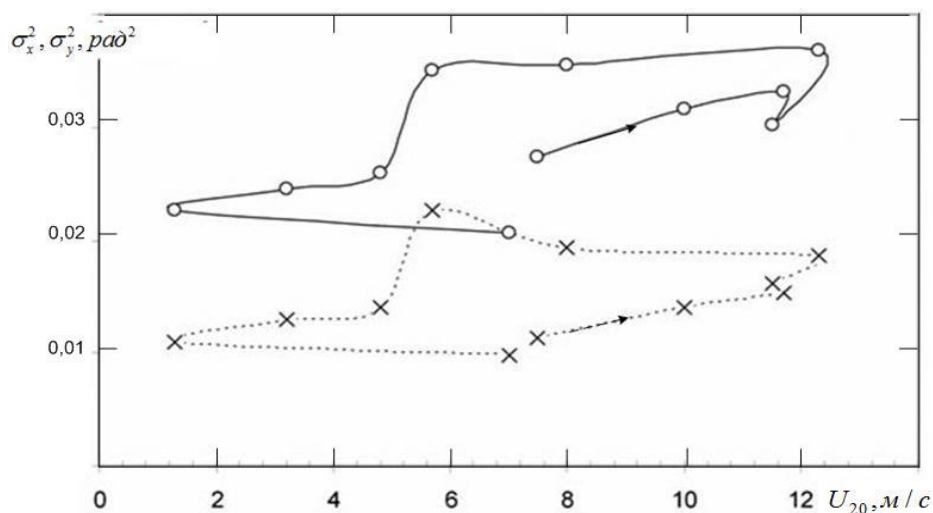


Рис.1. Пример эволюции ветрового режима и волновой обстановки во времени.

Из рисунка хорошо видно, что при одном и том же значении скорости приводного ветра существует значительная разница между возможными минимальным и максимальным значением дисперсии уклонов в этом “гистерезисе”, например на участке 6-7м/с. Согласно варианту Кокса-Манка (см.Таб.1) получается разница в скорости разгонного ветра около 5.5 м/с (от 5.3 to 10.5 м/с), Бурцева-Пелевина - достигает 9 м/с (от 9.6 до 18.5 м/с), а для Калинина-Лейкина доходит до 12 м/с (от 11 до 23 м/с)!

За весь экспедиционный период был собран большой массив независимых волнографических данных, когда данные с волнографа и метеодатчиков снимались круглосуточно с заданной периодичностью. При этом, в частности, в разные сезоны наблюдения реализовались различные варианты стратификации приземного слоя атмосферы. На рис.2 приводятся совокупные результаты волнографических измерений за периоды октябрь- ноябрь 1989г. и июнь-июль 1990г. Значения дисперсии уклонов крупных волн вдоль и поперек направления разгонного ветра выделены в отдельные группы.

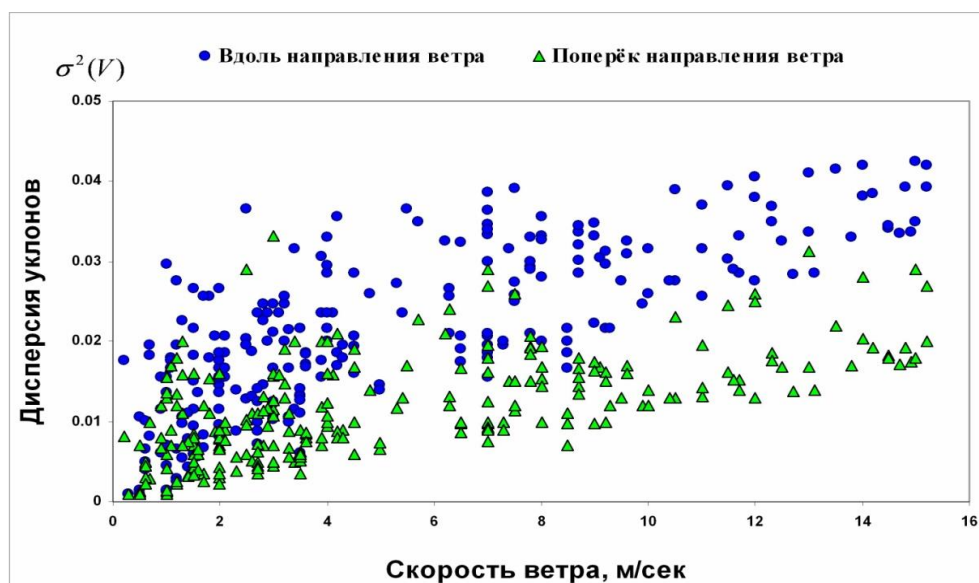


Рис.2. Совокупные данные по статистике поверхностного волнения за период измерений.

В отношении статистики полностью развитого волнения, в отличие от статистики ветрового, между данными и вариантами их интерпретации у различных исследователей наблюдается явный разноречивый. Например, по мнению того же Московитца [14], лишь около 5% (!) всех рассмотренных случаев достаточно близки к теоретической ситуации полностью развитого волнения. В упомянутой выше работе Калинина и Лейкина [7], полностью развитым было признано волнение всего лишь в 14 случаях за целый месяц интенсивных измерений в Каспийском море. Очевидно, что цитируемые океанологи использовали какие-то весьма жесткие критерии развитости. Может быть, именно в этом кроется причина столь разительного отличия зависимостей Бурцева - Пелевина и Калинина - Лейкина от более ранних результатов Кокса - Манка [8,9]? На долю ветрового волнения нами отнесено 35-40% от общего числа реализаций. В половине всех исследованных случаев ветрового волнения (т.е. 15-20% от общего числа), волнение находилось в стадии развития или затухания. В зависимости от ветрового режима, величины дисперсии уклонов вдоль и поперек направления ветра могли приобретать значения в довольно широком диапазоне вокруг значений соответствующих квазиравновесному “достаточно развитому”. В другой половине случаев (15-20% от общего числа) ветровое волнение было интерпретировано нами как практически развитое. В качестве критерия развитости рассматривалось сочетание следующих условий: 1) скорость и направление приводного ветра остаются практически неизменными в течение 3 и более часов; 2) по прямым и косвенным признакам исключается наличие зыби; 3) величины дисперсии уклонов поверхностных волн вдоль и поперек направления разгонного ветра остаются постоянными или могут незначительно убывать. Подчеркнем, что за все время летних наблюдений (июнь-июль 1990г) нам ни разу не удалось наблюдать такого рода состояние поверхности с продолжительностью более 5 часов. В то же время при работах весной и осенью (март-апрель, октябрь- ноябрь 1989г) такого рода примеры периодически наблюдались при постоянно дующих (из открытого моря вдоль береговой черты) умеренных и свежих ветрах. При обработке данных, полученных для нашего варианта критерия “достаточно развитого” волнения были вполне определенно выделены следующие 2-е области:

1) Область I – разгонный ветер имеет значение от практически 0 до 8-9 м/с. Здесь выявляется линейная зависимость (V – скорость ветра на высоте 19.5 м) со следующими характеристиками:

$$\begin{aligned}\sigma_x^2(V) &= 0.0016 + 0.0028 \cdot V \\ \sigma_y^2(V) &= 0.0014 + 0.0014 \cdot V \\ \sigma^2(V) &= \sigma_x^2(V) + \sigma_y^2(V) = 0.003 + 0.0042 \cdot V \pm 0.004 \\ \langle \sigma_y^2(V) / \sigma_x^2(V) \rangle &\approx 0.53\end{aligned}\tag{4a}$$

2) Область II - разгонный ветер имеет значение от 9 до 15 м/с. Здесь становится заметным уменьшение наклона кривой (практически вдвое), так что при линейной аппроксимации в этом диапазоне значений разгонного ветра получается:

$$\begin{aligned}\sigma_x^2(V) &= 0.0153 + 0.0014 \cdot V \\ \sigma_y^2(V) &= 0.0063 + 0.0008 \cdot V \\ \sigma^2(V) &= \sigma_x^2(V) + \sigma_y^2(V) = 0.0216 + 0.0022 \cdot V \pm 0.003 \\ \langle \sigma_y^2(V) / \sigma_x^2(V) \rangle &\approx 0.51\end{aligned}\tag{4б}$$

Сравнение полученных результатов (кривая 4) с зависимостями Кокса-Манка (кр.1), Бурцева- Пелевина (кр.2) и Калинина- Лейкина (кр.3) представлено ниже на рис.3 (все зависимости приведены к высоте 19.5 м). Из этого сравнения видно, что можно найти некие черты схожести со всеми тремя вышеупомянутыми исследованиями. В частности, зависимости “вдоль направления разгонного ветра” и

“интегрально по углу”, полученные в Области I (4а), чрезвычайно близки к результатам Кокса- Манка. Это делает весьма вероятным предположение о близости значений показателя пространственного разрешения для нашего волнографического комплекса (~42см) и аэрофотографического метода, использованного Коксом и Манком. Действительно, в найденной автором впоследствии основополагающей работе этих исследователей [8] сообщается о том, что высота полета летающей лаборатории составляла 2000 футов (~610м), а бортовая фотооптическая установка позволяла разрешать с этой высоты 2 светящиеся точки на поверхности, разнесенные на расстояние более 40 см. Таким образом, в обоих случаях речь идет о поверхностных волнах длиной более ~85-90 см.

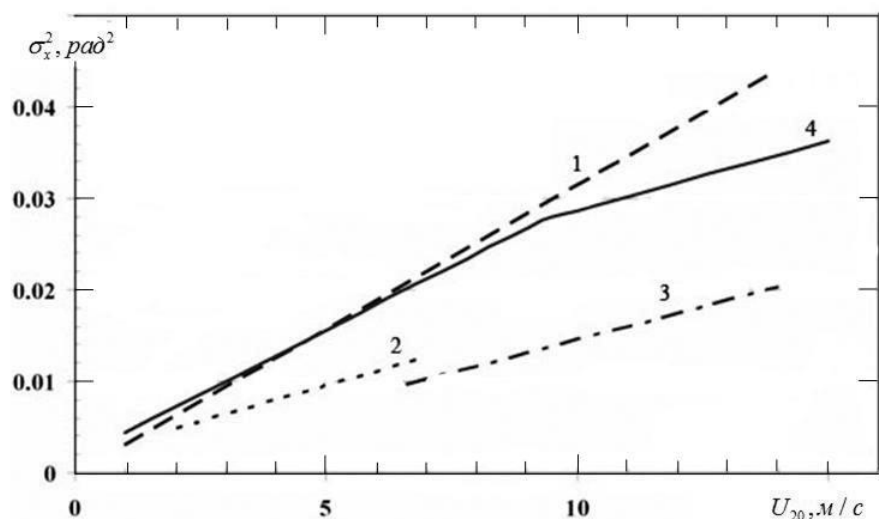


Рис.3а. Сравнение вариантов зависимостей предлагаемых различными исследователями для случая развитого ветрового волнения. Дисперсия уклонов вдоль направления разгонного ветра.

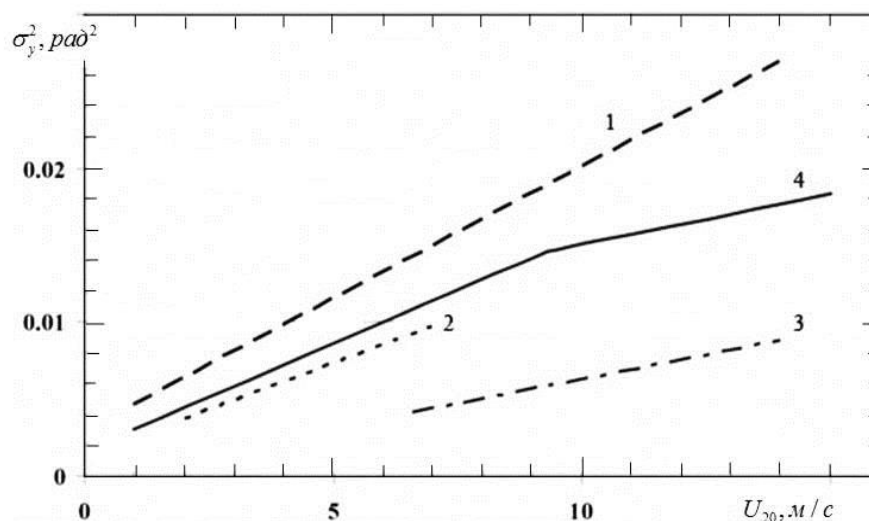


Рис.3б. Сравнение вариантов зависимостей предлагаемых различными исследователями для случая развитого ветрового волнения. Дисперсия уклонов поперек направления разгонного ветра.

По-видимому, следует признать справедливость утверждения Китайгородского [14] о необходимости согласования между заинтересованными исследователями единых количественных и статистических критериев по принятию решения о степени

“развитости”. При этом, с точки зрения специалиста по дистанционному зондированию поверхности океана, представляется важным, чтобы эти критерии отвечали на практике достаточно большой вероятности реализации, а не требовали чрезмерной “идеализации” с вероятностью реализации, стремящейся к нулю.

После обработки результатов комплексных радиометрических измерений было получено около 60 пригодных для последующего анализа экспериментальных серий. Эти серии представляли собой совокупность данных по рассеянию падающего СВЧ-излучения Солнца на взволнованной морской поверхности при относительно невысоком фиксированном положении светила над горизонтом – т.е. в режиме “солнечная дорожка”. Каждая такая “дорожка” состояла из данных измерения отраженного солнечного радиоизлучения на горизонтальной и вертикальной поляризациях в диапазонах 6.0 см (5 ГГц), 2.25 см (13.33 ГГц) и 0.8 см (37.5 ГГц) под разными надирными углами приемной антенны при практически неизменном угле Солнца. Высота Солнца над горизонтом составляла от 15 до 42 градусов (зенитный угол Солнца от 48 до 75 градусов). Каждой “дорожке” дополнительно ставились в соответствие величины радиояркостной температуры (спектрального потока) источника в указанных диапазонах, параметры приводного слоя атмосферы и верхнего слоя воды, а также данные волнографического комплекса о характеристиках спектра уклонов крупных морских волн.

Величины вклада отраженного в области квазизеркального рассеяния солнечного радиоизлучения в измеряемую антенную температуру при слабых и умеренных ветрах достаточно велики. Заметна, также и чувствительность этих величин к изменению степени шероховатости морской поверхности. Во всяком случае, она существенно больше, чем чувствительность уровня собственного теплового излучения морской поверхности к состоянию поверхности. Это дало основание считать, что можно существенно уточнить методику расчета взаимодействия СВЧ радиоизлучения с полем шероховатости взволнованной морской поверхности. Для этого необходимо было скорректировать теоретическую расчетную модель путем сравнения с полученными экспериментальными данными – т.е. повторить процедуру вывода, проделанную ранее Холлингером [12] и Вилхайтом [13]. Однако, в отличие от них, у нас теперь имелись не только параметры скорости ветра, но и знание фактического состояния поля шероховатости морского волнения! При расчетах были использованы стандартная безоблачная модель атмосферы и аппроксимация влияния пены аналогичная применяемой Вилхайтом [3,13]. Как и ожидалось – хорошее совпадение между теоретическим расчетом и данными эксперимента достигалось лишь в том случае, когда для расчета использовалась только определенная доля от величины дисперсии уклонов, измеренной с помощью волнографа (см.рис.2). После статистического усреднения (по обеим поляризациям одновременно) для каждой длины волны были получены усредненные коэффициенты для пересчета дисперсии крупных морских волн, измеренной волнографом с базой 42см в различных ветроволновых условиях, к фракции волн “крупных по Кирхгофу” для используемой радиоволны с частотой излучения f . Диапазонам 6.0 см (5 ГГц), 2.25 см (13.33 ГГц) и 0.8 см (37.5 ГГц) при этом соответствуют значения коэффициентов коррекции: 0.36 (± 0.05), 0.47 (± 0.07) и 0.62 (± 0.08). В результате линейной интерполяции возникает наш вариант зависящей от частоты зондирования f (в ГГц) функции частотной коррекции $C(f)$:

$$\sigma_r^2(f, V) = \sigma_{42cm}^2(V) \cdot C(f) = \sigma_{42cm}^2(V) \cdot (0.34 + 0.0076f), \quad \text{for } 3 \leq f \leq 50 \text{ ГГц} \quad (5)$$

В случае развитого волнения эту формулу (5) можно также использовать для трансформации зависимостей (4) при скоростях ветра до ~16м/с или Кокса- Манка при скорости ветра до ~9м/с. На рис.4 представлены для сравнения полученные здесь

результат (5) и “косая ступенька” - частотная аппроксимация Холлингера- Вилхайта (3). Действие нашего варианта было первоначально ограничено диапазоном от 3 до 50 ГГц.

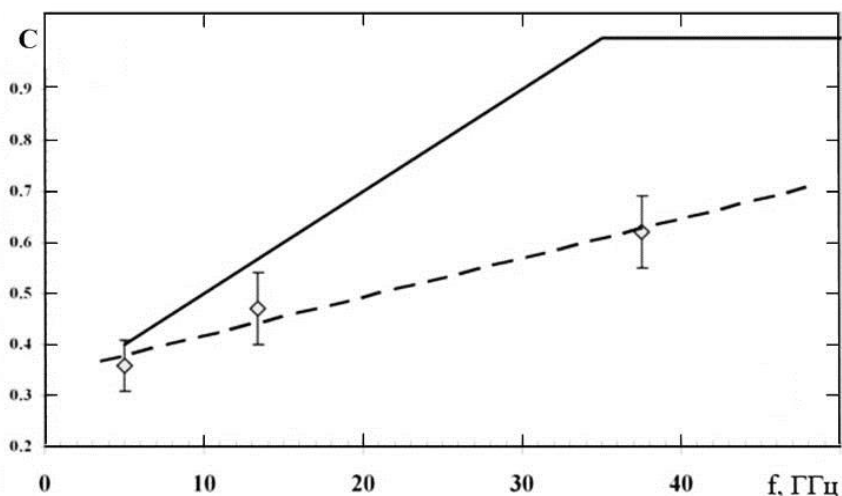


Рис.4. Сравнение полученного варианта функции частотной коррекции $C(f)$ и ранней версии Холлингера- Вилхайта.

В экспериментах на платформе в 2007 г. и 2009 г., которые проводились М.Т.Смирновым и коллегами [16,17], были получены результаты подтверждающие разработанную методику расчетов и для случая дециметровых волн. Эти эксперименты проводились в годы спокойного Солнца, использовались малогабаритные узкополосные супергетеродинные СВЧ радиометры L диапазона с применением неподвижной рупорно-линзовой антенны. Антенна была направлена на морскую поверхность под фиксированным углом 57° относительно надира для центрального луча диаграммы. Ширина диаграммы направленности на частоте 1.423 ГГц (длина волны 21.1см) составляла примерно 34° по уровню половинной мощности (очень широкая ДНА!). Модельные расчеты вклада Солнца в принимаемое излучение были выполнены описанным в данной работе вариантом метода Кирхгофа. На рис.5 на фоне экспериментальных данных за 23 октября 2009 года приводятся данные расчета величины вклада отраженного солнечного радиоизлучения для трех значений скорости приводного ветра на стандартной высоте равной 19.5 метра: 1) $V= 5$ м/с (темно-синяя кривая); 2) $V= 10$ м/с (коричневая кривая); 3) $V= 15$ м/с (красная кривая). Плотность потока во время измерений составляла около 56 СЕП, температура воды показывала слабый рост от 16 до 17.5°C , соленость была практически неизменной и равной 17.9‰, была также отмечена сильная зашумленность теплового сигнала от нескольких близко расположенных станций мобильной связи (см. рис.5).

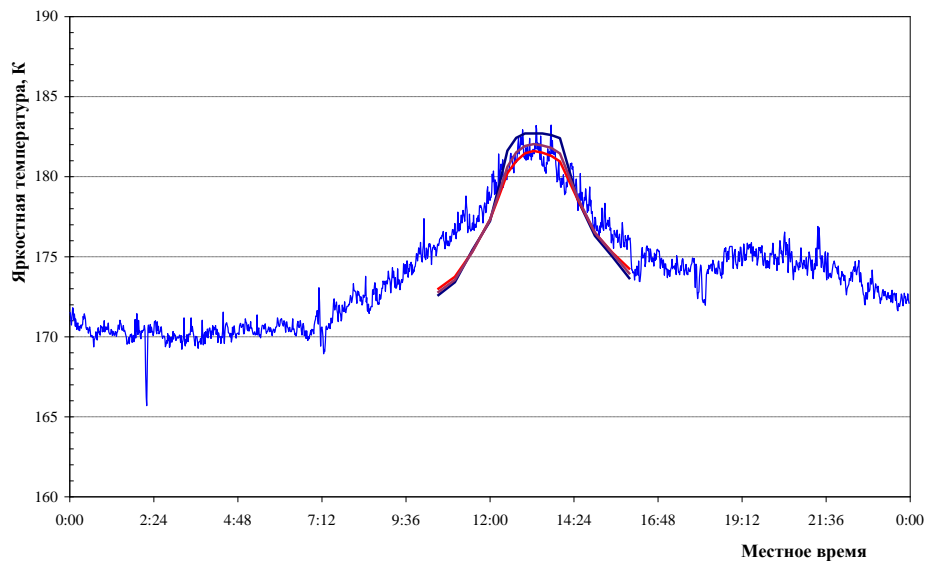


Рис.5. Сравнение теоретически рассчитанных и экспериментальных данных по прохождению отраженного Солнца через диаграмму направленности приемной антенны (23 октября 2009г., $\lambda=21.1\text{см}$, вертикальная поляризация).

Сравнение показывает, что общий характер и максимальное значение вклада излучения Солнца в принимаемое излучение неплохо описываются в рамках принятой модели и для этого диапазона радиоволн (1-3 ГГц). Так, сравнение теоретических кривых свидетельствует о том, что состояние поля крупномасштабных шероховатостей по принятой модели развитого волнения соответствует величине разгонного ветра (на стандартной высоте 19.5 м) приблизительно в 12.5 ± 1.5 м/с. Сверка с метеоданными показала, что с 7-00 часов местного времени до ~18-00 сила ветра действительно колебалась от 11 до 14 м/с. В принципе, данный эксперимент показал достаточно небольшое расхождение по величине максимального вклада между различными “ветровыми кривыми” – в пределах 2° К при переходе от 5 к 15 м/с. Это объясняется прежде всего выбором вертикальной поляризации и конкретного угла наблюдения (около 57°) для центрального луча, широкой и симметричной ДНА и стабильно малым значением потока (~56 СЕП) спокойного Солнца во время измерения. Из сравнения с экспериментальными данными следует также возможность и необходимость доработки модели расчетов путем аккуратного учета диаграммы направленности антенны [18], а также диффузной составляющей рассеяния для того, чтобы устранить расхождения между результатами расчетов и экспериментом на склонах “солнечного пика”.

Литература

1. F. Ulaby, R. Moore, A.Fung Microwave remote sensing, active and passive. -London: Addison Wesley Publ. Comp., V.1-3, 1983.
2. Шутко А.М. СВЧ – радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. -М.: Наука, 1986, 192с.
3. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: Ленанд, 2016, 338с.
4. Караев В.Ю., Каневский М.Б., Мешков Е.М. Упрощенное описание морского волнения для задач радиолокационного дистанционного зондирования / Исслед. Земли из космоса, 2011, №2, с.26-39.

5. Панфилова М.А., Караев В.Ю. Использование данных морских буев для оценки дисперсии наклонов крупномасштабного волнения для Ку- и Ка-диапазонов // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016, Т.13, №6, с.119-134.
6. Запевалов А.С. Влияние уклонов длинных волн на взаимодействие радиоволн с морской поверхностью // Журнал радиоэлектроники, 2017, №7, с.3-15 (1-13).
7. Запевалов А.С. К расчету оценок уклонов морской поверхности по данным квазизеркального зондирования в СВЧ диапазоне // Журнал радиоэлектроники, 2017, №3, с.4-18 (1-15).
8. C. Cox, W. Munk Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter // J. of the Optical Society of America, November 1954, V.44, N.11, pp.838-851.
9. C. Cox, W. Munk Slopes of the Sea Surface Deduced from Photographs of Sun Glitter // Scripps. Inst. of Oceanogr. Bull., 1956, V.6, N.9.
10. Пелевин В.Н., Бурцев Ю.Г. Измерение наклонов элементарных площадок поверхности волнующегося моря // Оптические исследования в океане и в атмосфере над океаном. М.: 1975, с.202-218.
11. Калинин С.А., Лейкин И.А. Измерение уклонов ветровых волн в Каспийском море // Изв. АН СССР, ФАО, 1988, Т.24, №11, с.1210-1217.
12. J.P. Hollinger Passive microwave measurements of sea surface roughness // *IEEE Trans. Geosci. Electr.*, 1971, V. GE-9.
13. Wilheit T.T. A Model for the Microwave Emissivity of the Ocean's Surface as a Function of Wind Speed // *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, V. GE-17, N.4, October 1979.
14. Китайгородский С.А. Физика взаимодействия атмосферы и океана. -Л.: Гидрометеиздат, 1970, 284с.
15. Данилычев М.В., Николаев А.Н., Кутуза Б.Г. Использование метода Кирхгофа для практических расчетов в микроволновой радиометрии взволнованной морской поверхности // Радиотехника и электроника, 2009, Т.54, №8, с.915-925.
16. Данилычев М.В., Кутуза Б.Г., Смирнов М.Т. Роль Солнца в СВЧ- радиометрии системы "океан-атмосфера" // Журнал радиоэлектроники, 2011, №6, с.3-31(1-29).
17. Смирнов М.Т., Данилычев М.В. Анализ вклада радиоизлучения спокойного Солнца в тепловое излучение морской поверхности в L-диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011, Т.8, №3, с.33-37.
18. Ключко В.К., Макарова О.Н. Влияние характеристик антенной системы радиометра на точность восстановления изображений // Вестник Рязанского ГРТУ, 2016, №57, с.16-20.