

Одновременное определение диэлектрических свойств морской поверхности, ее волнового состояния и температуры воды в скин-слое по дистанционным измерениям собственных излучений морской поверхности и атмосферы в ИК-диапазоне

И.Т. Бубукин, К.С. Станкевич

*Федеральное государственное научное учреждение "Научно-исследовательский радиофизический институт" 603950, г. Нижний Новгород. Большая Печерская ул, д. 25/12а,
E-mail: bubn@nirfi.sci-nnov.ru, stnk@nirfi.sci-nnov.ru*

Разработан метод одновременного определения диэлектрической проницаемости, температуры и волнового состояния морской поверхности по измерениям собственных излучений морской поверхности и атмосферы в ИК-диапазоне. Получено основное уравнение дистанционного зондирования морской поверхности для ИК-диапазона с учетом морского волнения. Показано, что в ИК-диапазоне по корреляции коэффициента отражения морской поверхности с тепловым излучением атмосферы по зеркальному лучу в широком интервале надирных углов (включая пригоризонтные) определяется дисперсия уклонов морских волн, и ее величина является оперативным индикатором состояния морской поверхности в процессе натурных измерений.

A method for simultaneous determination of the dielectric constant, temperature and wave state of the sea surface from measurements of intrinsic radiation of the sea surface and the atmosphere in the infrared range. The basic equation of remote sensing of sea surface for the infrared light from the sea swell. It is shown that in the IR range of the correlation coefficient of reflection of the sea surface with thermal radiation of the atmosphere on the mirror beam in a wide range of nadir angles is determined by the dispersion slope of the sea waves, and its magnitude is an operational indicator of the sea surface in situ measurements.

Введение

В [1,2] описан дистанционный метод диагностики плёночного слоя морской поверхности по её собственному уходящему ИК-излучению, позволяющий определять в натуральных условиях температуру и отражательную способность (диэлектрическую проницаемость) воды в скин-слое. Экспериментальные данные показывают, что состояние диэлектрической проницаемости воды в скин-слое ИК-диапазона изменчиво и может меняться со временем. Согласно разработанной модели изменчивость можно объяснить различием объемной концентрации воды и микропузырьков воздуха в статистической смеси под пленкой поверхностного натяжения морской поверхности. Для определения свойств микропузырькового слоя под пленкой поверхностного натяжения морской поверхности важно установить воздействие на него морского волнения по измерениям в ИК-диапазоне собственных излучений морской поверхности и атмосферы в широком диапазоне углов (включая пригоризонтные - меньше 30° от горизонта), одновременно с определением параметров смеси микропузырькового слоя и температуры воды.

Основное уравнение переноса интенсивности излучения, для решения задач дистанционного зондирования морской поверхности в ИК-диапазоне

В ИК-диапазоне все морское волнение является крупномасштабным, т.е. горизонтальные размеры волн (в том числе и капиллярных) много больше длины волны принимаемого излучения λ , поэтому в уравнении (1) для коэффициентов отражения использованы формулы Френеля (описывающие отражение от ровной поверхности), а

волнение учитывается путем введения наклонов площадки в точке пересечения с лучом зрения (приближение Кирхгофа).

Следуя [1,2] основное уравнение для интенсивности ИК-излучения взволнованной морской поверхности в направлении угла визирования λ (отсчитывается от надира) имеет вид:

$$I_{\lambda M}(\lambda, \theta, \zeta(t), \eta(t)) = (1 - R_F(\lambda, \theta, \zeta(t), \eta(t))) \cdot I_{\lambda W}(\lambda) + R_F(\lambda, \theta, \zeta(t), \eta(t)) \cdot I_{\lambda H}(\lambda, \theta, \zeta(t), \eta(t)) \quad (1)$$

здесь $R_F(\lambda, \theta, \zeta(t), \eta(t))$ - коэффициент отражения ИК-излучения по мощности в точке пересечения взволнованной поверхности моря с лучом зрения, определяемый формулами Френеля, $I_{\lambda W}(\lambda)$ - интенсивность излучения воды в скин-слое на длине волны λ , $\zeta(t), \eta(t)$ - тангенсы углов наклона поверхности в точке пересечения с лучом зрения в двух ортогональных направлениях, $I_{\lambda H}(\lambda, \theta, \zeta(t), \eta(t))$ - интенсивность нисходящего излучения атмосферы по зеркальному лучу. В (1) не учитывалось поглощение и излучение атмосферы на трассе между антенной и морской поверхностью ввиду малости расстояния между ними при наземных измерениях.

Все входящие в (1) величины изменяются со временем t . Ограничимся в рассмотрении случаем, когда ветровое волнение не превосходит 3-4 баллов, и не образуются пена и брызги, влияющие на излучательную способность морской поверхности. За время измерения P усредняется значение интенсивности излучения I_M и коэффициента отражения R_F .

Натурные исследования в ИК-диапазоне проводятся с приборами, имеющими довольно широкую полосу пропускания. Тогда измеряемой величиной является интеграл от интенсивности по длине волны в пределах полосы приемника $\lambda_1 \div \lambda_2$.

В результате усреднения по времени и учета полосы частот прибора уравнение переноса излучения (1) запишется в виде:

$$I_M(\theta) = I_W(1 - R_F(\lambda^*, \theta)) + R_F(\lambda_1^*, \theta) I_H(\theta) \xi(\theta) \quad (2)$$

$$\xi(\theta) = \frac{\frac{1}{P} \int_0^P R_F(\lambda_1^*, \theta, \zeta(t), \eta(t)) \cdot I_H(\theta, \zeta(t), \eta(t)) dt}{I_H(\theta) \frac{1}{P} \int_0^P R_F(\lambda_1^*, \theta, \zeta(t), \eta(t)) dt} \quad (3)$$

Множитель $\xi(\theta)$, учитывает корреляцию флуктуаций коэффициента отражения $R_F(\lambda_1^*, \theta, \zeta(t), \eta(t))$ и интенсивности излучения атмосферы по зеркальному лучу $I_H(\theta, \zeta(t), \eta(t))$ имеющую место в следствии изменения уклонов морской поверхности.

Его можно оценить, используя измеренные зависимости интенсивности излучения атмосферы $I_H(\theta, \zeta(t), \eta(t))$ от угла визирования θ и коэффициенты отражения, измеренные или вычисленные для волнения, уклоны волн которого $\zeta(t)$ и $\eta(t)$ измеряются или задаются известными моделями ветровой зависимости [3]. На рис.1, как пример, приведены графики зависимости величины ξ от дисперсии уклонов морской поверхности, для углов визирования $\theta = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ$ градусов от горизонта, полученные по измеренным зависимостям интенсивности излучения атмосферы от угла визирования.

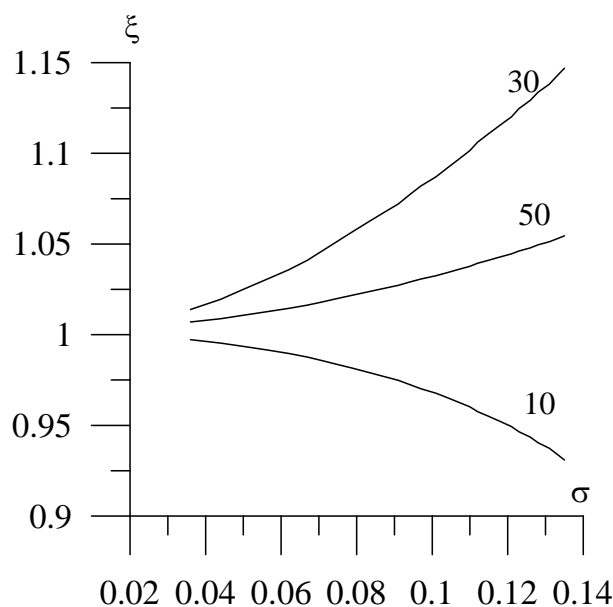


Рис. 1. Зависимости корреляционного множителя $\xi(\theta)$ от дисперсии уклонов σ морского волнения

Как видно из графика, зависимость $\xi(\theta)$ от волнения является оперативным индикатором волнового состояния морской поверхности на углах меньших 30 градусов от горизонта.

Одновременные натурные измерения коэффициентов отражения, температуры и волнового состояния морской поверхности в ИК-диапазоне методом переменной зеркальной подсветки

Исследования ИК-излучения морской поверхности в диапазоне 8-14 мкм проводились в августе в Отузском заливе Черного моря. Аппаратура была установлена на конце пирса Карадагского природного заповедника. Описание постановки эксперимента и аппаратурного комплекса содержится в [2]. Предлагаемый метод одновременного измерения коэффициента отражения и волнового состояния морской поверхности основан на линейной функциональной зависимости между интенсивностями излучений моря и атмосферы, представленной выражением (2). Если за время длительности эксперимента изменяется интенсивность ИК-излучения атмосферы $I_H(\theta)$, а интенсивность излучения воды в скин-слое I_w и коэффициент отражения $R_F(\lambda^*, \theta)$ остаются постоянными, то совокупность измеренных абсолютных величин интенсивностей излучений $I_M(\theta)$ и $I_H(\theta) \cdot \xi(\theta)$ образуют корреляционную зависимость, наклон которой, как следует из (2) определяет коэффициент отражения морской поверхности в натуральных условиях.

При изменении волнового состояния морской поверхности наклон регрессионной прямой меняется, что является следствием того, что множитель $\xi(\theta)$ учитывающий корреляцию флуктуаций коэффициента отражения и интенсивности излучения атмосферы по зеркальному лучу является функцией дисперсии уклонов морской поверхности т.е. ее волнового состояния. Как видно из рис. 1 зависимость корреляционного множителя от дисперсии уклонов волн на углах визирования больших 30° от горизонта существенно уменьшается. Это позволяет при измерениях в широком диапазоне углов получить одновременно диэлектрические характеристики морской поверхности, дисперсию уклонов волн и температуру воды в скин-слое.

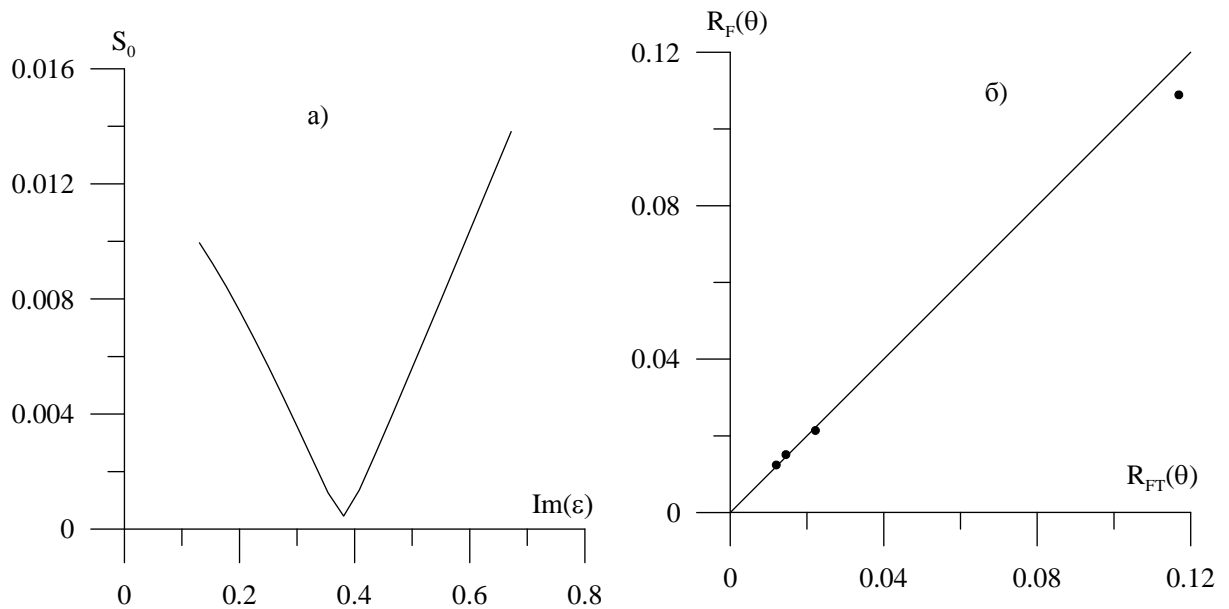


Рис. 2. Зависимости S_0 от диэлектрической проницаемости среды в скин-слое ε (а) и $R_F(\theta)$ от $R_{FT}(\theta)$ при минимальном S_0 для $\theta = -10^\circ$

На первом этапе используются измерения на углах визирования больших 30° от горизонта. Для этой группы измерений влияние волнения несущественно и единственным параметром для определения $R_F(\theta)$ является диэлектрическая проницаемость среды в скин-слое $\varepsilon_{\text{экс}}$, где формируется излучение. Критерием выбора $\varepsilon_{\text{экс}}$ из всех значений ε являлся минимум среднеквадратичного отклонения S_0^2 зависимости измеренных $R_F(\theta)$ от $R_{FT}(\theta)$ (вычисленных по формулам Френеля) от линейной. На рис. 2а, для одного из сеансов измерений, показана полученная таким образом зависимость S_0 от $\text{Im}(\varepsilon)$. На рис. 2б показана зависимость $R_F(\theta)$ в зависимости от $R_{FT}(\theta)$ (точки) при минимальном значении S_0 , сплошная — уравнение $Y=X$.

В результате было получено экспериментальное значение диэлектрической проницаемости воды в скин-слое в натуральных условиях при ветровом волнении: $\varepsilon_{\text{экс}} = 1.32 - i \cdot 0.38$. Полученные значения интерпретированы в модели статистической смеси, состоящей из 80% воды и 20% микропузырьков воздуха, формирующейся под пленкой поверхностного натяжения.

На втором этапе определялась дисперсия уклонов морского волнения по измерениям на всех углах визирования. Критерием выбора $\sigma_{\text{экс}}$ является минимум среднеквадратичного отклонения от линейной зависимости измеренных $R_F(\theta)$ и вычисленных по формулам Френеля $R_{FT}(\theta)$ с использованием экспериментально определенного $\varepsilon_{\text{экс}}$ (рис.3а). Определенная таким образом дисперсия уклонов волн равна $\sigma_{\text{экс}} = 0.046$, что является характеристикой неразвитого волнового состояния морской поверхности во время наблюдений. Для развитого волнения при той же силе ветра 2-3 балла дисперсия уклонов волн была бы на 60% больше [3]. На рис. 3б нанесены сплошная кривая $R_{FT}(\theta)$ - коэффициент отражения вычисленный по формулам Френеля при экспериментально определенном значении $\varepsilon_{\text{экс}}$, на которую нанесены точками измеренные коэффициенты отражения $R_F(\theta)$ при $\sigma_{\text{экс}} = 0.046$.

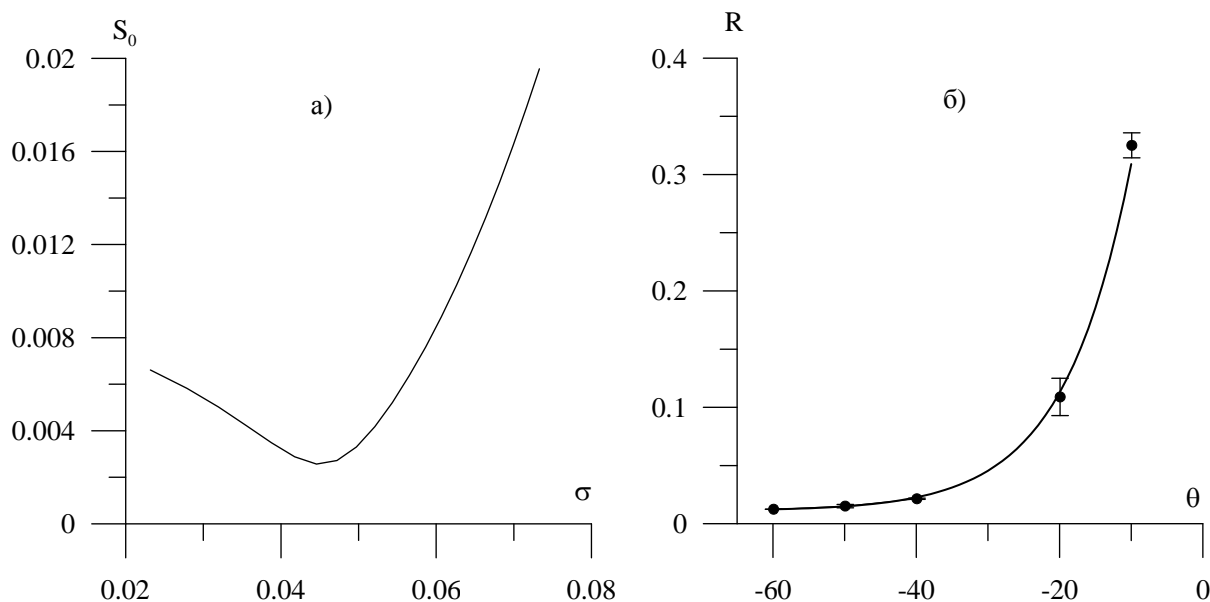


Рис. 3. Зависимости S_0 от дисперсия уклонов морского волнения (а) и измеренных коэффициентов отражения $R_F(\theta)$ (точки) и вычисленного $R_{FT}(\theta)$ (сплошная) от угла визирования после определения диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{экс}}$ и дисперсия уклонов $\sigma_{\text{экс}}$

Как видно из (2) при измеренных коэффициентах отражения $R_F(\theta)$ можно определить интенсивность ИК-излучения воды I_w , а по ней температуру воды в скин-слое T_w [2]. Полученное среднее значение температуры воды в скин-слое за время наблюдений $T_w = 25.5\text{C}$. Показано, что из-за систематической ошибки определения температуры воды по априорным данным о коэффициенте отражения [4], температура в скин-слое увеличивается на 0.5C .

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Нижегородской области (проект № 08-02-97019).

Литература

1. Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Радиометрия температурной плёнки морской поверхности // Успехи современной радиоэлектроники.- 2006.- №11.- С.39-55.
2. Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Натурные измерения отражательной способности пленочного слоя морской поверхности в ИК-диапазоне // Труды XXII Всероссийской научной конференции Распространение радиоволн 22-26 сентября 2008 г., Ростов-на-Дону – п.Лоо. Труды т.3, стр.116-119.
3. Cox С., Munk W. // J. Opt. Soc. Amer. 1954. V.44. №11. P.838.
4. Кодратьев К.Я., Бургов М.П., Гайнулин И.Ф., Тотунова Г.Ф. Инфракрасный спектр поглощения жидкой воды // "Проблемы физики атмосферы". сб.2. Изд. Ленинград. университета. -1963.- С.87-112.