

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 535.36; 621.396.11

СПЕКТРЫ ТЕПЛООВОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛЕНКИ ГОМОГЕННОЙ НЕФТИ НА ВОДЕ

© 2024 г. В. А. Голунов*, М. Г. Евтихов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино, Московская обл., 141190 Российская Федерация

*E-mail: golsnow@mail.ru

Поступила в редакцию 05.07.2023 г.

После доработки 12.11.2023 г.

Принята к публикации 24.12.2023 г.

Выполнены расчеты спектральных зависимостей радиояркостной температуры плоской поверхности гомогенной нефтяной пленки на воде от вида поляризации, угла наблюдения, толщины пленки и термодинамической температуры воды в интервале частот 15...40 ГГц. Разработан алгоритм обработки данных дистанционного зондирования, позволяющий в полосе частот 25...40 ГГц существенно уменьшить влияние атмосферы и термодинамической температуры воды на идентификацию интерференционных зависимостей выходного сигнала радиометров от толщины нефтяной пленки. При этом исключается необходимость проведения абсолютной калибровки радиометров.

Ключевые слова: нефтяная пленка, поверхность воды, радиояркостная температура, излучение атмосферы, микроволны, алгоритм обработки

DOI: 10.31857/S0033849424090021, **EDN:** HSONMN

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач экологического мониторинга речных и морских акваторий является обнаружение и оценка объема разливов нефти. Самую серьезную опасность представляют крупные аварийные разливы нефти и нефтепродуктов при крушении танкеров и взрывы нефтяных платформ. Предупредить все возможные катастрофы на сегодняшний день практически невозможно. Разработка быстрого и эффективного мониторинга разливов нефти является одним из необходимых условий для их своевременной ликвидации и предотвращения тяжелых экологических последствий.

Для обнаружения зон разлива нефти используются разнообразные средства: от оптических до радиолокационных [1–6]. Одной из проблем при ликвидации разливов нефти на воде является определение распределения толщины слоя нефти, поскольку большая часть нефти может содержаться в небольшой части площади разлива [1]. Знание расположения толстых пятен позволяет более эффективно использовать ресурсы очистки.

Проблема измерения толщины слоя нефти на воде решается в течение последних 30...40 лет. Ряд используемых методов измерения толщины нефти включает инфракрасное изображение, лазерную флуоресценцию, оптическое изображение

и радиометрию микроволнового диапазона. Наиболее перспективным признается метод пассивного дистанционного зондирования. Суть метода заключается в приеме теплового излучения водной поверхности на двух и более частотах микроволнового диапазона, поскольку интенсивность теплового излучения периодическим образом зависит от толщины слоя нефти. Существенным преимуществом использования теплового излучения микроволнового диапазона является возможность круглосуточного измерения толщины слоя нефти. Однако интенсивность теплового излучения поверхности зависит, кроме частоты излучения и толщины нефтяного слоя, от диэлектрических свойств и температуры нефти и воды, а также от подсвечивающего излучения атмосферы, вносящего вклад в интенсивность принимаемого радиометром теплового излучения водной поверхности. Таким образом, решение задачи восстановления толщины слоя нефти на воде затрудняется вследствие множества неизвестных параметров. Очевидно, что наибольшие трудности возникают при зондировании только на двух частотах, поскольку для решения задачи требуются априорная информация о параметрах воды и нефти (особенно, если нефть эмульгирована) и прецизионная калибровка радиометров на ортогональных поляризациях [7].

Более перспективным направлением является многочастотное зондирование. Впервые широкие возможности многочастотного зондирования показаны в [5] на примере результатов измерения радиояркостной температуры однородного слоя нефти на шестнадцати частотах в диапазоне от 26 до 40 ГГц. Однако дальнейшего развития эти исследования не имели, что, возможно, было связано с трудно реализуемым по тем временам техническим решением. К настоящему времени известны лишь два радиометрических комплекса, применяемых в полевых условиях. Один из них представляет собой коммерческий бортовой сканирующий трехчастотный (18.7; 36.5 и 89 ГГц) радиометр OPTIMARE, (<https://www.optimare.de/airborne-sensors/mwt-p>) способный измерять толщину пленки нефти от 0.05 до 3 мм. Особенности калибровки радиометров и использования какой-либо априорной информации не известны.

Другой комплекс представляет собой переносной поляризационный двухчастотный (12 и 34 ГГц) радиометрический измеритель [8]. Для измерения толщины пленки нефти на воде от 0.2 до 12 мм необходимо, чтобы угол зондирования составлял 55° от нормали и имелась априорная информация о диэлектрических параметрах нефти и термодинамической температуре воды.

Цель данной работы – развитие дистанционного метода восстановления толщины нефтяной пленки на воде с помощью приема теплового излучения в широкой полосе частот радиометром-спектрометром, не требующим внешней калибровки. Рассмотрение возможностей метода основывается на строгих теоретических расчетах широкополосных спектров теплового микроволнового излучения нефти на воде в зависимости от угла зондирования, вида поляризации, диэлектрических параметров нефти и температуры воды. В данной части работы рассматривается только гомогенная нефть.

1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Радиояркостная температура T собственного микроволнового излучения среды в соответствии с приближением Релея–Джинса и законом Кирхгофа определяется в виде

$$T = \kappa T_0, \quad (1)$$

где T_0 – термодинамическая температура воды, κ – коэффициент излучения. Коэффициент излучения полубесконечной среды связан с ее коэффициентом отражения R законом сохранения энергии:

$$\kappa = 1 - R. \quad (2)$$

Коэффициент отражения R двухслойной среды с плоскими границами выражается через

комплексный амплитудный коэффициент отражения Френеля r как $R = |r|^2$. Комплексный амплитудный коэффициент отражения плоского слоя на подложке записывают в форме [9]

$$r = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(2i\beta h)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(2i\beta h)}, \quad (3)$$

где h – толщина слоя, i – мнимая единица, r_{12} – коэффициент амплитудного отражения Френеля на границе воздух–нефть, r_{23} – коэффициент амплитудного отражения Френеля на границе нефть–вода,

$$\beta = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_2 - \epsilon_1 \sin^2 \theta},$$

$\epsilon_1 = 1$ – диэлектрическая проницаемость воздуха, ϵ_2 – комплексная диэлектрическая проницаемость нефти, f – частота излучения, θ – вертикальный угол излучения.

В общем случае комплексный коэффициент β может зависеть от частоты f не только прямо, но и косвенно через диэлектрические параметры сред. При возрастании частоты коэффициент отражения (и, соответственно, интенсивность собственного излучения) последовательно достигает максимальных и минимальных значений. В оптике тонкослойных покрытий [10] подобное достижение максимальных значений интенсивности называют “просветлением”, минимальных – “антипросветлением” пленок.

Вывод формул Френеля основан на законах Снеллиуса и справедлив только при достаточно больших углах скольжения и для прозрачных сред. При нарушении этих условий возникают определенные сложности [11,12]. В [12] удалось обойти эти теоретические сложности и достаточно корректно вывести формулы Френеля для немагнитных изотропных сред при прохождении волны из прозрачной среды в среду с поглощением. Методы вывода формул Френеля из [12] были применены к более общим многослойным пластинам из квазианизотропных сред с поглощением [13]. Использование обобщенных численных алгоритмов [13] обеспечивает нам сравнимость результатов с предыдущими и последующими вычислительными экспериментами при усложнении и упрощении исследуемых моделей.

Комплексная диэлектрическая проницаемость ϵ_b пресной воды рассчитывалась по следующим соотношениям [14]:

$$\epsilon'_2 = \epsilon_0 + \frac{\epsilon_s - \epsilon_0}{1 + (\lambda_s/\lambda)^2}, \quad \epsilon''_2 = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_0)(\lambda_s/\lambda)}{1 + (\lambda_s/\lambda)^2}, \quad (4)$$

где $\epsilon_0 = 5.5$, $\epsilon_s = 0.00081t^2 - 0.40885t + 88.2$,

$\lambda_s = 1.4662^{-0.0634t} + 0.000136t^2 - 0.027296t + 1.8735116$,
 t — термодинамическая температура воды (размерность — градусы по шкале Цельсия).

При расчетах использована комплексная диэлектрическая проницаемость «сухой» нефти, равная $\varepsilon_n = 2.085 + i0.05$ (соответствующий показатель преломления $n_n = 1.43 + i0.0173$) и не зависящая от температуры нефти [5,15].

2. РАСЧЕТНЫЕ СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛОСЕ ЧАСТОТ 15...40 ГГц

При использовании соотношений (3)–(4) были рассчитаны спектры излучения воды с пленкой нефти в полосе частот 15...40 ГГц для ортогональных поляризаций при значениях температуры воды 0...30 °C, толщины пленки 0...10 мм и вертикально угла зондирования 0...70°.

Анализ расчетных данных показал, что для восстановления толщины слоя нефти наиболее целесообразно использовать зондирование на горизонтальной поляризации при угле 50° от надир, во-первых, в силу более сильных амплитуд интерференционных осцилляций яркостной температуры в сравнении с амплитудами на вертикальной поляризации (см. рис. 1а и 1б) и, следовательно, более высокого отношения сигнал/шум. Во-вторых, это значение угла широко используется в сканирующих системах дистанционного зондирования с бортовых носителей для формирования радиотепловых изображений земной поверхности [16].

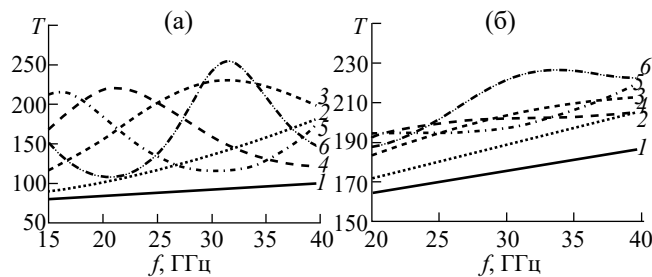


Рис. 1. Спектры радиояркостной температуры собственного излучения плоской поверхности воды (1) и плоского слоя нефти на воде при $h = 1$ (2), 2 (3), 3 (4), 5 (5) и 6 мм (6) при горизонтальной (а) и вертикальной (б) поляризациях; термодинамическая температура воды 293 К.

На рис. 2 представлены спектральные зависимости радиояркостной температуры воды с пленкой и без пленки нефти, рассчитанные при различных значениях ее температуры: 0, 10, 20 и 30 °C. Видно, что при заданной термодинамической температуре

воды каждая интерференционная кривая является уникальной в сравнении со всеми другими возможными кривыми, но изменение температуры воды приводит к смещению интерференционных кривых $T(f)$, рассчитанных при равных толщинах слоя нефти.

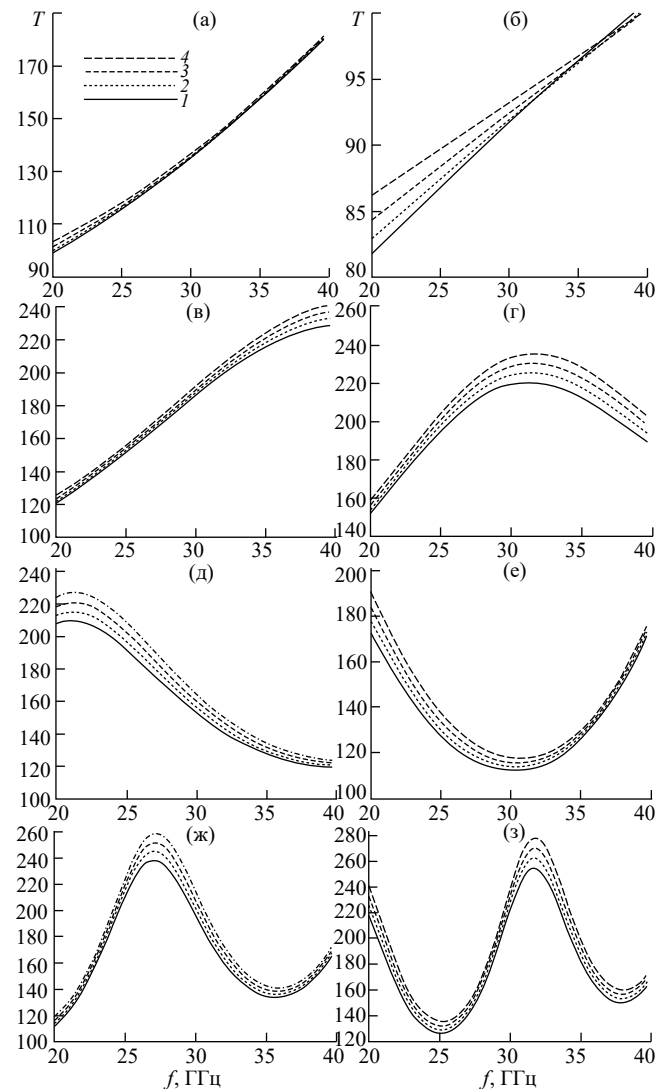


Рис. 2. Спектры радиояркостной температуры собственного излучения плоского слоя нефти на воде при $h = 0$ (а), 1 (б), 1.5 (в), 2 (г), 3 (д), 4 (е), 7 (ж) и 10 мм (з) и при $T_0 = 273$ (1), 283 (2), 293 (3) и 303 К (4); поляризация горизонтальная, угол излучения 50°.

Очевидно, что это смещение обусловлено зависимостью диэлектрических свойств воды от ее температуры.

3. ВЛИЯНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

До сих пор рассматривалось собственное излучение поверхности воды. В натуральных условиях радиометр наряду с собственным излучением поверхности воды принимает отраженное ею излучение атмосферы. Яркостная температура нисходящего излучения чистой атмосферы в приближении плоскостной среды выражается, как правило, в следующем виде [17]:

$$T_a^\downarrow(\theta) = \bar{T}[1 - \exp(-\Gamma \sec \theta)], \quad (5)$$

где $\bar{T}$ – усредненная по вертикальному профилю термодинамическая температура атмосферы, Γ – полное вертикальное поглощение. Таким образом, яркостная температура плоской поверхности воды с учетом влияния атмосферы запишется в виде

$$T(\theta) = \kappa(\theta)T_0 + R(\theta)T_a^\downarrow(\theta). \quad (6)$$

Как следует из (5) и (6), увеличение угла θ приводит к возрастанию вклада подсвечивающего излучения атмосферы в радиояркостную температуру поверхности воды, что, с одной стороны, сужает ее динамический диапазон при изменении толщины нефтяной пленки, а с другой стороны, ухудшает отношение сигнал/шум. В качестве оптимального диапазона угла наблюдения принято использовать значения 50...55° [17,18].

Кроме того, из (6) следует, что яркостная температура воды зависит от яркостной температуры атмосферы линейно, что позволяет за счет следующей процедуры обработки результатов измерений исключить влияние вариаций радиояркостности атмосферы.

Допустим, что радиояркостная температура атмосферы не зависит от частоты. Это допустимо на интервале частот 25...40 ГГц между линиями поглощения водяного пара 22.5 ГГц и кислорода 60 ГГц [17]. Выделим на интерференционной кривой $T(f, h = \text{const})$ в указанной выше полосе частот минимальное $T_{\min}(f_1)$ и максимальное $T_{\max}(f_2)$ значения яркостной температуры воды:

$$T_{\min} = \kappa(f_1)T_0 + R(f_1)T_a^\downarrow, \quad (7)$$

$$T_{\max} = \kappa(f_2)T_0 + R(f_2)T_a^\downarrow. \quad (8)$$

Разность $\Delta T(f_1, f_2)$ яркостных температур (7) и (8) с учетом (2) запишется в виде

$$\Delta T(f_1, f_2) = [R(f_1) - R(f_2)](T_0 - T_a^\downarrow). \quad (9)$$

Далее аналогичным образом формируем разности $\Delta T(f_1, f)$ яркостных температур на всех других частотах f и нормируем их на разность (9), получая параметр p :

$$p = \frac{\Delta T(f, f_1)}{\Delta T(f_1, f_2)} = \frac{R(f_1) - R(f)}{R(f_1) - R(f_2)}. \quad (10)$$

Учитывая, что выходное напряжение u радиометров линейно зависит от яркостной температуры входящего теплового излучения в виде

$$u = aT + b$$

(a, b – постоянные коэффициенты), запишем соотношение (10) следующим образом:

$$p = \frac{\Delta u(f, f_1)}{\Delta u(f_1, f_2)} = \frac{R(f_1) - R(f)}{R(f_1) - R(f_2)}. \quad (11)$$

Из (11) следует, что в результате предложенной нормировки интерференционные кривые, соответствующие собственному излучению воды с нефтяной пленкой, восстанавливаются при излучающей атмосфере, при этом исключается необходимость внешней калибровки радиометров. Более того, применение алгоритма (11) приводит к существенному ослаблению зависимости интерференционных кривых от термодинамической температуры воды. Действительно, изменение температуры воды сопровождается изменением ее диэлектрических параметров, но при заданной толщине пленки это не приводит к смещению интерференционной кривой по частоте, поскольку на каждой частоте фазовый набег в пленке определяется только ее толщиной и диэлектрической проницаемостью.

На рис. 3 представлены интерференционные кривые, полученные в результате нормировки в соответствии с (10), (11) спектральных зависимостей яркостной температуры (см. рис. 2). Видно, что при изменении температуры воды от 273 до 303 К смещение нормированных интерференционных кривых при каждой заданной толщине пленки существенно меньше по сравнению с абсолютными данными на рис. 2.

Алгоритм (11) сохраняет свою эффективность также при обработке данных зондирования из космоса. Действительно, радиояркостная температура водной поверхности при зондировании из космоса записывается в виде

$$T(\theta) = [\kappa(\theta)T_0 + R(\theta)T_a^\downarrow(\theta)] \exp(-\Gamma \sec \theta) + T_a^\uparrow, \quad (12)$$

где $T_a^\uparrow$ – радиояркостная температура восходящего излучения атмосферы. Нетрудно убедиться, что в результате формирования разности (9) при использовании (12) исчезает слагаемое $T_a^\uparrow$, а при формировании отношения (10) исчезает множитель $\exp(-\Gamma \sec \theta)$, что в конечном итоге приводит к (11).

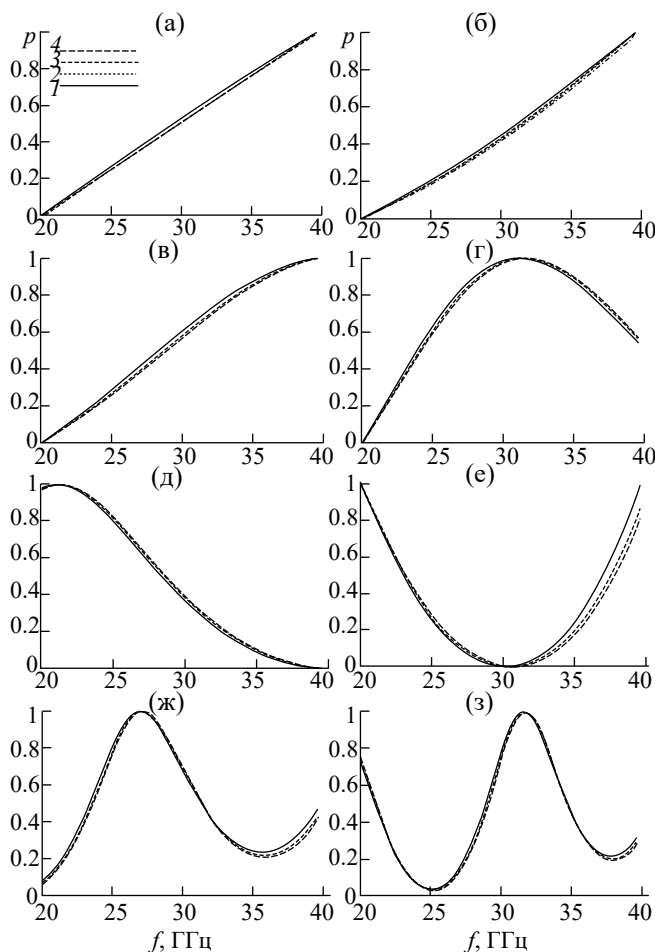


Рис. 3. Нормированные спектры интенсивности излучения плоского слоя нефти на воде при $h = 0$ (а), 1 (б), 1.5 (в), 2 (г), 3 (д), 4 (е), 7 (ж) и 10 мм (з) и при $T_0 = 273$ (1), 283 (2), 293 (3) и 303 К (4); поляризация горизонтальная, угол излучения 50° .

4. ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Возникает закономерный вопрос: полностью ли исключается влияние вариаций интенсивности излучения атмосферы при описанных выше относительных измерениях. Ответ на этот вопрос получим, если в соотношении (6), связывающем выходной сигнал радиометра и интенсивность излучения среды, учесть собственные шумы радиометра, выраженные при их среднеквадратическом напряжении N :

$$u = a T + b + N. \quad (13)$$

Учитывая некоррелированность шумов, для разности яркостных температур $\Delta T(f_1, f_2)$ (см. (9)) на основании (13) получим соотношение

$$\Delta u(f_1, f_2) = a (\Delta T(f_1, f_2)) + 2N. \quad (14)$$

Аналогичное соотношение будет справедливо и для разности температур $\Delta T(f, f_1)$. С учетом (9) и (13) соотношение (11) преобразуется к виду

$$p = \frac{[R(f_1) - R(f)](T_0 - T_a) + 2\delta T}{[R(f_1) - R(f_2)](T_0 - T_a) + 2\delta T}, \quad (15)$$

где $\delta T = N/a$ — мощность шумов, выраженная в градусах Кельвина, т.е. чувствительность радиометров.

При $2\delta T \ll [R(f_1) - R(f_2)](T_0 - T_a^\downarrow)$ соотношение (15) преобразуется к виду

$$p = \frac{R(f_1) - R(f)}{R(f_1) - R(f_2)} + \frac{2\delta T}{[R(f_1) - R(f_2)](T_0 - T_a^\downarrow)}. \quad (16)$$

Сравнивая (16) и (11), видим, что в (16) появилось дополнительное слагаемое, обусловленное собственными шумами радиометра. Введем следующие обозначения:

$$S = \frac{\Delta u(f, f_1)}{\Delta u(f_1, f_2)} = \frac{R(f_1) - R(f)}{R(f_1) - R(f_2)},$$

$$N_0 = \frac{2\delta T}{[R(f_1) - R(f_2)](T_0 - T_a^\downarrow)}.$$

Если величину S рассматривать в качестве полезного сигнала, а N_0 — в качестве аддитивного шума, то величина

$$\xi = \frac{S}{N_0} = \frac{[R(f_1) - R(f)](T_0 - T_a^\downarrow)}{2\delta T} \quad (17)$$

будет характеризовать отношение сигнал/шум. Это отношение, как следует из (17), зависит от разности $(T_0 - T_a^\downarrow)$, которая в условиях чистой атмосферы и в полосе частот 25...40 ГГц может варьироваться в пределах 260...280 К [17]. При чувствительности радиометра $\delta T = 0.1$ К при постоянной времени 1с отношение сигнал/шум $\xi = 34$ дБ. Таким образом, вариации яркости атмосферы при относительных измерениях проявляются через отношение сигнал/шум, оказывая тем самым влияние только на точность измерения относительных параметров излучения сред (при указанном выше условии $2\delta T \ll [R(f_1) - R(f_2)](T_0 - T_a^\downarrow)$).

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как было отмечено выше, идея использования широкополосной радиометрии для измерения толщины нефтяной пленки на воде впервые была предложена и экспериментально обоснована в [5]. В данной же работе выполнено более строгое обоснование перспективности метода измерения толщины нефтяной пленки на воде с помощью широкополосной радиометрии. Широкополосные

спектры теплового микроволнового излучения нефти на воде рассчитаны и проанализированы в зависимости от угла зондирования, вида поляризации, температуры воды и влияния подсвечивающего излучения атмосферы.

В результате было показано, что в полосе частот 25...40 ГГц за счет предложенного метода обработки результатов пассивного зондирования идентичность интерференционных кривых определяется только диэлектрической проницаемостью и толщиной нефтяной пленки, поскольку влияние излучения атмосферы и термодинамической температуры воды существенно ослабляется. Кроме того, исключается необходимость проведения абсолютной калибровки радиометров, что предусмотрено в [5,8], и в априорной информации о температуре воды, используемой в двухчастотном комплексе [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе выполнены расчеты радиояркостной температуры плоской поверхности гомогенной нефтяной пленки на воде на основе коэффициентов Френеля. Выполнен анализ расчетных данных, включающих зависимости радиояркостной температуры от вида поляризации, угла наблюдения, толщины пленки, термодинамической температуры воды и радиояркостной температуры подсвечивающего излучения атмосферы. Разработан алгоритм обработки данных дистанционного зондирования, позволяющий в полосе частот 25...40 ГГц существенно ослабить влияние атмосферы и термодинамической температуры воды на идентификацию интерференционных зависимостей выходного сигнала радиометров от толщины нефтяной пленки. При этом исключается необходимость проведения абсолютной калибровки радиометров, что также является существенным преимуществом разработанного метода.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hollinger J.L., Mennella R.A. // Sci. 1973. V. 181. № 4094. P. 54.
2. Богородский В.В., Кропоткин М.А. Дистанционное обнаружение нефтяных загрязнений вод ИК-лазером. Л.: Гидрометеиздат, 1975.
3. Fingas M., Brown C. // Mar. Pollut. Bull. 2014. V. 83. № 1. P. 9.
4. Мольков А.А., Капустин И.А., Ермошкин А.В. и др. // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 9.
5. Skou N. // IEEE Trans. 1986. V. GRS-24. № 3. P. 360.
6. Brown E.R., McMachon O.B., Murphy T.J. et al. // IEEE Trans. 1998. V. MTT-46. № 12. P. 1989.
7. Pelyushenko S.A. // Spill Sci. Technol. Bull. 1995. V. 2. № 4. P. 249.
8. Бирюльчик В., Рынин А., Советкин М. // Современные технологии автоматизации. 2003. № 2. С. 52.
9. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.
10. Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий. М.: Физматгиз, 1958.
11. Колоколов А.А. // Успехи физ. наук. 1999. Т. 169. № 9. С. 1025.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2003.
13. Евтихов М.Г. // РЭНСИТ. 2018. Т. 10. № 1. С. 91.
14. Розенберг В.И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. Л.: Гидрометеиздат. 1976.
15. Кротилов В.Д., Пелюшенко С.А., Ракуть И.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58. № 1. С. 24.
16. Amlien J. // Norsk Regnesentral (Norwegian Computing Center, NR). 2008. Report No. 1019. 52 p.
17. Голунов В.А., Загорин Г.К., Зражевский А.Ю. и др. Вопросы перспективной радиолокации. Пассивная радиолокация на миллиметровых волнах. М.: Радиотехника, 2003. С. 393.
18. Голунов В.А., Зражевский А.Ю., Павельев А.Г. // РЭ. 1988. Т. 33. № 12. С. 2544.

SPECTRA OF THERMAL MICROWAVE EMISSION FROM A FILM OF HOMOGENEOUS OIL ON WATER

V. A. Golunov*, M. G. Evtikhov

*Fryazino Branch Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS,
Vvedenskii Square, 1, Fryazino, Moscow Region, 141190 Russian Federation*

**E-mail: golsnow@mail.ru*

Received July 05, 2023, revised November 12, 2023, accepted December 24, 2023

The spectral dependences of the radio brightness temperature of the flat layer of a homogeneous oil film on water on the type of polarization, viewing angle, film thickness and thermodynamic temperature of water at a frequency range of 15...40 GHz are calculated. An algorithm for processing remote sensing data has been developed that allows in the frequency band of 25...40 GHz to significantly reduce the influence of the atmosphere and water thermodynamic temperature on the identification of interference dependencies of the radiometer output signal on the thickness of the oil film. This eliminates the need for absolute calibration of radiometers.

Keywords: oil film, water surface, radio brightness temperature, atmospheric radiation, microwaves, processing algorithm