

В.М. Климкин, В.Н. Федорищев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ФОНОВОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ВОДЫ В ЗАДАЧАХ ДИСТАНЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ПЛЕНОК

Методом численного моделирования проведен анализ возможности подавления сигналов подстилающего водного слоя в задаче дистанционного анализа пленок нефтепродуктов по спектрам лазерно-индуцированной флуоресценции.

Показано, что улучшение временного разрешения аппаратуры до 1 нс не приводит к значительному выигрышу в отношении сигнал-шум. Значительный положительный эффект дает переход к бистатической схеме зондирования. Дан простой путь расчета оптической схемы флуориметра.

Введение

Одним из факторов, ограничивающих чувствительность дистанционного спектрофлуориметра, используемого для обнаружения и анализа тонких пленок нефтепродуктов на поверхности вод, является фоновая флуоресценция воды, обусловленная органическими и минеральными примесями различной природы [1]. Хотя в естественных водах содержание примесей, как правило, невелико, наличие фоновых сигналов связано со значительной толщиной слоя воды, облучаемого лазерным импульсом (1–10 м), по сравнению с типичной толщиной регистрируемых пленок (1–10 мкм). Важной особенностью пленки как объекта дистанционного зондирования является изменчивость ее пространственного положения вследствие волнения водной поверхности.

Для подавления фоновых сигналов необходимо уменьшить толщину слоя воды, флуоресценция которой регистрируется детектором флуориметра. Это может быть сделано либо путем улучшения временного разрешения системы регистрации, либо с помощью пространственной селекции, например, бистатической схемы приемоподающего оптического тракта.

В настоящей статье выполнен численный анализ сигналов флуоресцентного лидара для оценки потенциальных возможностей обоих методов подавления фоновых сигналов.

1. Расчет и анализ сигналов дистанционного спектрофлуориметра для моностатической схемы зондирования

Предположим, что регистрируемый сигнал складывается из сигнала от тонкой нефтяной пленки $F(t)$ и сигнала фоновой флуоресценции воды $B(t)$. Считаем, что фоновая флуоресценция определяется свечением фитопланктона и РОВ, равномерно распределенных по водной толще. Обозначим суммарные коэффициенты поглощения нефтепродукта через k_n и воды через C_n , а коэффициенты поглощения на лазерной длине волны соответственно через k_L и C_L , флуоресценцию нефти будем описывать через квантовую эффективность φ_Φ и время затухания τ_Φ . Соответствующие параметры для фоновой флуоресценции обозначим через $\varphi_{\Phi,ф}$ и $\tau_{\Phi,ф}$.

Тогда выражение для энергии сигнала фоновой флуоресценции, регистрируемой приемной системой спектрофлуориметра в интервале времени $(t, t + \tau_d)$, можно представить в виде [2]:

$$B(t) = A \exp(-k_n h) \frac{\varphi_{\Phi,ф} C_L}{\tau_{\Phi,ф}} \int_t^{t+\tau_d} dt' \int_0^H dH' \xi(H') \exp(-C_n H' - \frac{t'}{\tau_{\Phi,ф}}) \int_0^{t'} dx \Theta(x) \exp\left(\frac{x}{\tau_{\Phi,ф}}\right), \quad (1)$$

где A – постоянная величина; $\exp(-k_n h)$ учитывает ослабление излучения нефтяной пленкой; $\Theta(x)$ – функция, описывающая временную форму лазерного импульса; H – глубина зондирования, связанная с временем t соотношением $H = ct/2n$ (c – скорость света; n – показатель преломления воды); τ_d – постоянная времени детектирования; $\xi(H)$ – геометрический форм-фактор приемной системы.

При выводе (1) принято во внимание, что в момент времени t , соответствующий проникновению переднего фронта лазерного импульса на глубину H , на приемный детектор попадает также излучение с меньших глубин H' вследствие конечной длительности лазерного импульса и <растянутости> процесса затухания флуоресценции во времени.

Для сигнала от нефтяной пленки, толщина h которой пренебрежимо мала по сравнению с глубиной проникновения лазерного импульса, интегралы по глубине и времени можно разделить, и в этом случае выражение (1) упрощается:

$$F(t) = A \xi_0 \frac{k_L \varphi_\Phi}{k_n \tau_\Phi} [1 - \exp(-k_n h)] \int_t^{t+\tau_d} dt' \exp(-t'/\tau_\Phi) \int_0^{t'} dx \Theta(x) \exp\left(\frac{x}{\tau_\Phi}\right), \quad (2)$$

где ξ_0 – геометрический форм-фактор, соответствующий поверхности пленки.

В расчетах будем полагать, что форма лазерного импульса описывается зависимостью [2]

$$\Theta(t) = (t/\tau_0)^n \exp(-t/\tau_0) / [\tau_0 \Gamma(n+1)] \quad (3)$$

при $n = 2$. В (3) τ_0 – характеристическое время лазерного импульса (максимальная амплитуда достигается при $t = n\tau_0$); Γ – гамма-функция.

Для определенности в расчетах будем использовать параметры, характерные для спектрофлуориметра, описанного в [1]. Примем $\tau_0 = \tau_d = 1$ нс. Коэффициенты k_L и k_n для сырой нефти также приведены в [1], а C_L и C_n рассчитаны для концентрации фитопланктона 10 мг/м^3 по данным, представленным в [3], и соответствуют лазерной длине волны 355 нм . Для простоты интерпретации данных примем аппаратный коэффициент A , квантовые эффективности φ_Φ и $\varphi_{\Phi,\Phi}$, а также геометрический форм-фактор ξ равными единице. Время затухания флуоресценции фитопланктона положим равным $\tau_{\Phi,\Phi} = 1$ нс, а для нефти рассмотрим два характерных времени $\tau_\Phi = 1$ и 10 нс. Временная форма сигнала рассчитывалась с шагом $\Delta t = 1$ нс, что соответствует пространственному разрешению в воде $0,1 \text{ м}$. Следует отметить, что регистрируемые аппаратурой реальные сигналы флуоресценции будут иметь большую длительность, поскольку представляют собой свертку выражений типа (1) или (2) с аппаратной функцией системы регистрации.

На рис. 1 представлены результаты расчета временной формы сигналов флуоресценции пленки нефти толщиной $0,5 \text{ мкм}$ на поверхности воды. На рисунке показаны результирующий сигнал $S(t)$ и его компоненты $F(t)$ и $B(t)$. В данном случае $\tau_\Phi = \tau_{\Phi,\Phi} = 1$ нс.

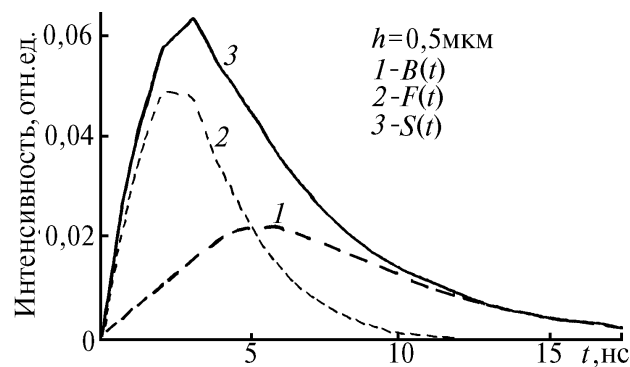


Рис. 1. Результаты расчета сигналов, регистрируемых от воды – 1, от пленки – 2, результирующий сигнал – 3

На рис. 2 показаны результирующие сигналы для различных толщин пленок. Семейство кривых I на рис. 2 соответствует $\tau_{\phi} = 1$ нс, а II – $\tau_{\phi} = 10$ нс. В первом случае форма кривой достаточно чутко реагирует на изменение толщины пленки и, следовательно, может быть использована для выделения сигнала от пленки при наличии фоновой флуоресценции. Используя для регистрации быстродействующее АЦП, можно, например, определять отношение сигналов в разные моменты времени или вычислять корреляцию сигнала с некоторым эталоном. Для нефтепродуктов с большим временем затухания флуоресценции ситуация, как видно из рис. 2, значительно хуже. Хотя и в этом случае отношение амплитуды сигналов в последовательные моменты времени изменяется с изменением толщины пленки.

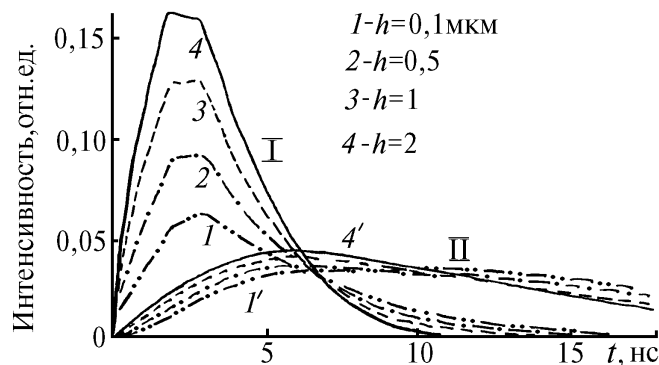


Рис. 2. Результаты расчетов сигналов, регистрируемых флуориметром для нефтепродуктов с малыми временами затухания ($\tau = 1$ нс) – I и относительно большими ($\tau = 10$ нс) – II для пленок различной толщины

2. Геометрический форм-фактор для биаксиальной оптической системы

Обычно при использовании лидарного уравнения полагают, что сигнал падает пропорционально квадрату расстояния до мишени. Однако как показано в [2], применение детекторов малого размера или полевых диафрагм (например моносветоволокон) в приемном тракте приводит к потере части оптического сигнала от ближних участков трассы зондирования, в результате чего на малых и средних дистанциях зондирования сигнал сложным образом зависит от расстояния. Этот эффект может быть учтен введением геометрического форм-фактора (ГФФ) лидара. Расчет ГФФ флуориметра для обнаружения нефтяных пленок может быть полезен также с точки зрения минимизации влияния фонового излучения воды. Оптическая система такого флуориметра должна регистрировать сигнал из возможно меньшего объема воды. Как уже отмечалось выше, этого можно добиться путем разнесения в пространстве оптических осей передающего и приемного объективов, т.е. с помощью биаксиальной схемы зондирования.

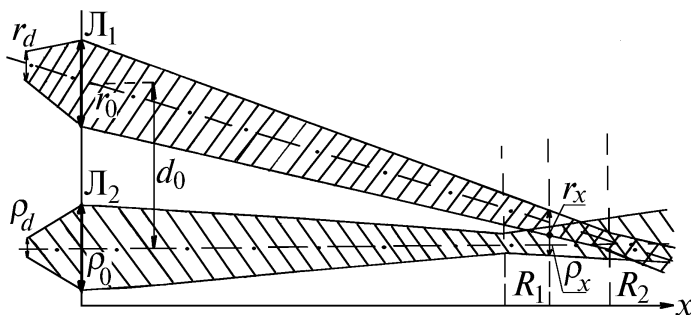


Рис. 3. К расчету геометрического форм-фактора

Рассмотрим оптическую систему, состоящую из передающего L_1 и приемного L_2 объективов, сопряженных с волоконными световодами (рис. 3). Пусть изображение выходного торца передающего световода сфокусировано на поверхность мишени, которая находится на расстоянии R_1 от плоскости передающей линзы, а изображение приемного световода – в точку, расположенную на расстоянии R_2 по оси x (рис. 3). Обозначим через r_0, ρ_0 радиусы выходных

апертур объективов; $f_{1,2}$ – их фокусные расстояния; d_0 – расстояние между осями объективов; r_x – радиус сечения пучка на расстоянии x от фокальной плоскости; r_d, ρ_d – радиусы торцов световолокон.

Вследствие перемешивания мод можно считать, что источником лазерного излучения является равномерно освещенный торец световода и что лазерное излучение по выходу из объектива распространяется по законам геометрической оптики. Введем безразмерные параметры $z_1 = x/R_1$, $W_1 = R_1/f_1$ и $N_1 = \rho_0 / \rho_d$. Тогда профиль лазерного пучка вдоль оси может быть представлен выражением

$$\frac{\rho(z_1)}{\rho_0} = \frac{W_1 - 1}{N_1} z_1 + \Theta(z_1) (z_1 - 1), \quad (4)$$

где

$$\Theta(z) = \begin{cases} 1 & \text{при } z \geq 1, \\ -1 & \text{при } z < 1. \end{cases}$$

Аналогичное выражение можно записать для поля зрения приемного телескопа. Регистрируемый приемником сигнал будет пропорционален коэффициенту перекрытия передающего и приемного пучков ξ [2]. Изображение сечения профиля поля зрения приемного объектива в произвольной точке z_2 образует в плоскости торца световода кружок рассеяния радиусом r'_d :

$$r'_d = r_d + 2 \Theta(z_2) (r_0 / z_2) (z_2 - 1) / (W_2 - 1). \quad (5)$$

Очевидно, что $r_d \leq r'_d$, поэтому только часть энергии сигнала из области перекрытия пучков попадает через волокно на детектор. Введем понятие коэффициента передачи изображения ξ_2 :

$$\xi_2(z_2) = r_d^2 / r'^2_d. \quad (6)$$

Тогда результирующий геометрический форм-фактор приемопередающей системы будет определяться произведением коэффициентов перекрытия пучков и передачи изображения (в предположении, что $z_1 \approx z_2 \approx z$)

$$\xi(z) = \xi_1(z) \xi_2(z). \quad (7)$$

Для анализа выражения (7) были проведены расчеты ГФФ для некоторых типичных конфигураций приемопередающей системы. За основу была взята конфигурация телескопа из [1] (все размеры, за исключением оговоренных случаев, даны в миллиметрах): $\rho_0 = 45$; $r_0 = 33$; $f_1 = 450$; $f_2 = 300$; $\rho_0 = 0,4$; $r_d = 0,125$; $d_0 = 85$. Для расчетов будем полагать, что плоскость мишени находится в точке $z_1 = 1$. Приемный объектив сфокусирован в точку $z_2 = z_1 + \Delta z$. Величины z_1 и z_2 связаны между собой соотношением $z_2 = z_1 R_1 / R_2$.

Рис. 4 иллюстрирует формирование ГФФ для рассмотренной конфигурации лидара при $\Delta z = 0,1$ и $R_1 = 25$ м. На рис. 5 представлены геометрические форм-факторы для этой же конфигурации при $\Delta z = 0$ для разных дистанций зондирования. Видно, что дистанция зондирования сказывается только на ширине ГФФ. Оценки показывают, что ширина ГФФ растет примерно пропорционально дистанции зондирования и радиусу приемного волокна и обратно пропорциональна диаметру и фокусному расстоянию приемного объектива.

При расфокусировке приемного и передающего объективов форма кривой ГФФ трансформируется из одно- в двухпиковую и кривая смещается относительно $z = 1$. Амплитуда и ширина кривой при $\Delta z > 0$ больше, чем при таком же отрицательном смещении. При малых дистанциях зондирования расфокусировка приводит к резкому падению величины ГФФ, тогда как при $R = 25$ м – лишь к уширению максимума кривой, т.е. к увеличению <глубины резкости> телескопа.

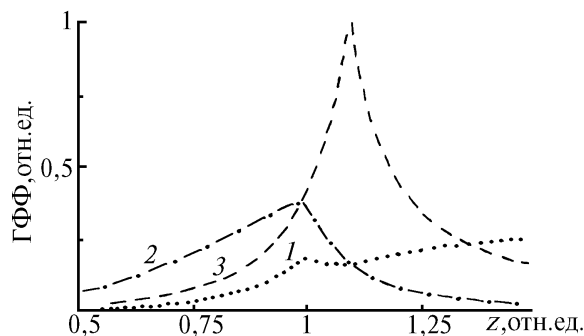


Рис. 4. Формирование геометрического форм-фактора для бистатического 2-линзового приемопередающего объектива: 1 – результирующий ГФФ; 2 – коэффициент перекрытия пучков; 3 – коэффициент передачи изображения

Расчеты показывают, что для $\Delta z = 0$ максимальное значение ГФФ достигается при $f_1/f_2 > 1$, т.к. в этом случае пятно лазера полностью попадает в поле зрения приемного объектива. Относительная ширина ГФФ $\delta z/\xi_{\max}$ минимальна при $f_1 = f_2$, поэтому расфокусировка объективов наиболее сильно сказывается на величине ГФФ. Следовательно, при выборе фокусных расстояний объективов необходимо соблюдать условие $f_1 \geq f_2$ для получения максимальной величины ГФФ, причем чем ближе f_1 к f_2 , тем уже относительная ширина ГФФ и, следовательно, меньше <глубина резкости> телескопа. Такие же закономерности наблюдаются для зависимости ГФФ от отношения радиусов волокон. В этом случае необходимо выполнение условия $r_d \geq \rho_d$.

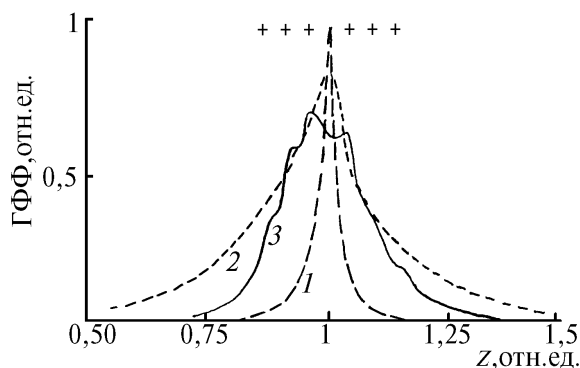


Рис. 5. Примеры геометрических форм-факторов: 1 – дистанция зондирования 5 м, 1-линзовый приемный объектив; 2 – дистанция зондирования 25 метров, 1-линзовый приемный объектив; 3 – 6-линзовый объектив, дистанция зондирования 5 м

Как следует из рис. 5, при малых дистанциях зондирования форма ГФФ близка к δ -функции и даже небольшое смещение плоскости мишени относительно плоскости фокусировки объективов приводит к резкому падению величины форм-фактора, а значит, и сигнала. Так, при $R = 5$ м смещение на Δz , равное 0,05, т.е. на ± 25 см, приводит к падению сигнала в 5 раз. При $R = 25$ м такое же уменьшение сигнала будет наблюдаться при смещении плоскостей на ± 5 м. Следовательно, для снижения чувствительности приемной системы к смещению плоскостей объекта и фокусировки целесообразна расфокусировка передающего и приемного объективов. Казалось бы, возникающее в связи с этим уменьшение максимальной величины ГФФ можно будет компенсировать увеличением площади приемного объектива, но тогда уменьшается ширина функции $\xi(z)$. Поэтому естественным представляется замена одного большого приемного объектива набором объективов меньшего диаметра с той же суммарной площадью приемной поверхности. К тому же индивидуальная фокусировка каждого объектива позволяет формировать более оптимальный профиль ГФФ.

Эти рассуждения иллюстрирует кривая 3 на рис. 5, представляющая собой геометрический форм-фактор для системы из шести приемных объективов, расположенных осесиммет-

рично вокруг центрального передающего объектива. Точки фокусировки каждого из объективов помечены знаками <+> в верхней части рисунка. Подбирая положение точек фокусировки для каждого объектива, можно получить профиль ГФФ с достаточно плоской вершиной.

3. Расчет и анализ сигналов дистанционного спектрофлуориметра для бистатической схемы зондирования

Как было показано выше, анализ временной формы регистрируемого суммарного сигнала флуоресценции дает ограниченные возможности выделения полезного сигнала от пленки нефтепродукта. В то же время формы кривых для флуоресценции воды и пленок нефтепродуктов с малыми временами затухания заметно отличаются. Поэтому представляет интерес анализ возможности разделения этих сигналов. Рассмотрим оптическую систему, имеющую один передающий и два приемных объектива (см. фрагмент на рис. 6). Пусть передающий и один из приемных объективов сфокусированы на поверхность пленки, а другой – ниже поверхности воды. В этом случае, как следует из проведенного анализа геометрических форм-факторов, отношение сигнал-фон в первом канале будет максимальным, а второй канал будет регистрировать в основном фоновое излучение воды, которое может служить репером для первого канала.

На рис. 6 представлены временные зависимости сигналов в информационном (семейство кривых I) и фоновом (кривые II) каналах, рассчитанные по формулам (1) и (2) с учетом геометрического форм-фактора. Сигналы соответствуют различным толщинам пленок нефтепродуктов с малыми ($\tau \sim 1$ нс) временами затухания флуоресценции. Предполагалось, что плоскости фокусировки приемных объективов сдвинуты на 0,5 м, а дистанция зондирования равна 5,25 м. В расчетах использованы параметры оптической системы, приведенные в предыдущем разделе. Из рис. 6 следует, что для нефтепродуктов с малым τ отношение амплитуд сигналов в двух каналах изменяется от 1 без пленки до 2,5 при пленках толщиной $h = 5$ мкм. Для нефтепродуктов с большим τ отношение сигнал-шум в этом случае меньше, но оно может быть увеличено расфокусировкой объективов или увеличением базы между ними.

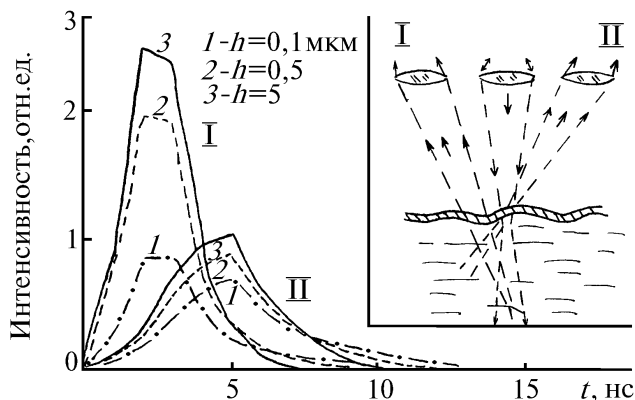


Рис. 6. Результаты расчета сигналов для бистатической схемы зондирования: I – сигналы в информационном канале, II – сигналы в канале, регистрирующем фоновую флуоресценцию

Заключение

Таким образом, подавление фоновых сигналов от водной толщи в задаче дистанционного анализа пленок нефтепродуктов по их флуоресценции является довольно сложной проблемой. Проведенный анализ двух возможных методов улучшения отношения сигнал-шум показал следующее.

Метод, ориентированный на высокое временное разрешение аппаратуры, перспективен для обнаружения и анализа пленок нефтепродуктов с малыми временами затухания флуоресценции τ . Для нефтепродуктов с большими τ метод теряет свою эффективность. Следует также учесть, что необходимый диапазон временного разрешения ~ 1 нс и выше требует значительного усложнения аппаратной части флуориметра.

Метод пространственно-временного анализа, ориентированный на бистатическую схему зондирования, позволяет достигать высокого отношения сигнал-фон даже в случае применения аппаратуры, не имеющей высокого временного разрешения. При размещении флуориметра на судне реализация этого подхода не имеет принципиальных трудностей. Однако такие трудности могут появиться при размещении флуориметра на борту авиационного носителя. В частности, уже при полете на нижней границе разрешенных высот (50 м для вертолета) необходимо виброустойчивое крепление объективов с расстоянием между ними 1 м и более.

1. Климкин В.М., Соковиков В.Г., Федорищев В.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 2. С. 189–205.
2. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
3. Орлов В.М., Самохвалов И.В., Белов М.П. и др. Дистанционный контроль верхнего слоя океана. / Новосибирск: Наука, 1991. С. 124–136.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
17 мая 1994 г.

V.M. Klimkin, V.N. Fedorishchev. Examination of Possibility to Suppress Signals of Water Background Fluorescence for Problems of Oil Films Remote Detection.

The possibility to suppress signals from water background layer was analyzed numerically for the problem of oil films remote detection by laser-induced fluorescent spectra. The gain in temporal resolution of the instrument up to 1 ns is shown to produce only insignificant gain in the signal/noise ratio. Considerably better result may be obtained by using bistatic scheme of the sounding. A simple way to calculate the optical circuit of the fluorimeter is described in the paper.