

**ЛАЗЕРНЫЙ МОНОИМПУЛЬСНЫЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ МЕТОД
МОНИТОРИНГА НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ**

М.Л. Белов

belov@bmstu.ru

А.М. Белов

ekomonit@bmstu.ru

В.А. Городничев

gorod@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Исследованы возможности использования лазерного моноимпульсного флуоресцентного метода в задаче дистанционного зондирования утечек нефтепроводов и обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности. Показано, что использование для анализа регистрируемого флуоресцентного сигнала от земной поверхности метода поиска квазирешений позволяет при погрешности измерений 1,5 % удовлетворительно (с погрешностью 20...30 %) восстанавливать пространственное распределение эффективного квантового выхода флуоресценции зондируемой поверхности в секторе обзора приемной оптической системы лидара. Анализ этого распределения дает возможность определить местоположение участков земной поверхности с высоким уровнем лазерно-индуцированной флуоресценции. Использование метода роя для поиска квазирешений позволяет сократить время вычислений по сравнению с методом полного перебора. При регистрации лазерно-индуцированной флуоресценции в нескольких спектральных диапазонах можно решить задачу идентификации — определить на земной поверхности участки с нефтяным загрязнением

Ключевые слова

Мониторинг нефтяных загрязнений, лазерно-индуцированная флуоресценция, моноимпульсный метод, земная поверхность

Поступила в редакцию 06.06.2018
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (грант № 13.7377.2017/БЧ)

Введение. В настоящее время одним из наиболее оперативных методов контроля состояния земной поверхности является авиационное зондирование с использованием сенсоров, работающих в различных спектральных диапазонах.

В оптическом спектральном диапазоне перспективно применение лидарных систем с пространственным сканированием и моноимпульсных систем без сканирования для обеспечения необходимой полосы обзора на земной поверхности [1–3].

В лидарных системах зондирования с пространственным сканированием продольная развертка (вдоль направления полета) обеспечивается за счет движения авиационного носителя, а поперечная — за счет сканирования лазерного луча плоскости, перпендикулярной направлению полета (с использованием вращающейся призмы, качающегося зеркала или акустооптического дефлектора и т. п.).

Для сокращения времени обзора (что важно при большой скорости полета авиационного носителя) и упрощения аппаратной реализации (за счет отсутствия сканирующей системы и использования одноплощадочного фотоприемника) применяют моноимпульсные системы без сканирования. Их работа основана на излучении лидаром зондирующего импульса, приеме и специальной обработке сигнала, отраженного от зондируемой земной поверхности.

Актуальной задачей экологического мониторинга является контроль утечек нефтепроводов.

Существующие в настоящее время системы обнаружения утечек на трубопроводах [4] имеют предел чувствительности от единиц до десятых долей процента от расхода нефтепровода и утечки меньшей интенсивности не регистрируют.

Для дистанционного контроля нефтяных загрязнений и обнаружения утечек нефти на сегодняшний день наиболее эффективными являются лазерные флуоресцентные методы [5].

Физической основой флуоресцентных методов является значительное превышение интенсивности лазерно-индуцированного излучения от нефтяного загрязнения над интенсивностью лазерно-индуцированного излучения почвы и большинства природных образований на земной поверхности.

На рис. 1, 2 приведены спектры лазерно-индуцированной флуоресценции различных нефтей при разных длинах волн возбуждения флуоресценции [6, 7].

Из рисунков следует, что спектр флуоресценции нефтей имеет хорошо выраженный максимум, расположенный (в зависимости от вида нефти и длины волны возбуждения флуоресценции) в диапазоне от 450 до 550 нм.

Поэтому в наиболее простом случае лидарную флуоресцентную систему мониторинга утечек нефтепровода можно реализовать, выбирая диапазон регистрации приемной системы лидара в области максимума спектра флуоресценции конкретного типа нефти.

Далее, для этого случая исследуются возможности использования лазерного моноимпульсного флуоресцентного метода в задаче мониторинга утечек нефтепроводов и нефтяных загрязнений на земной поверхности.

Постановка задачи. Регистрируемая в приемном тракте флуоресцентного лидара мощность сигнала лазерно-индуцированной флуоресценции в случае вертикального зондирования однородных по своим оптическим характеристикам природных объектов (когда источник, приемник и их оптические оси совмещены и угол поля зрения приемника много больше угла расходимости источника) может быть рассчитана по формуле [8, 9]:

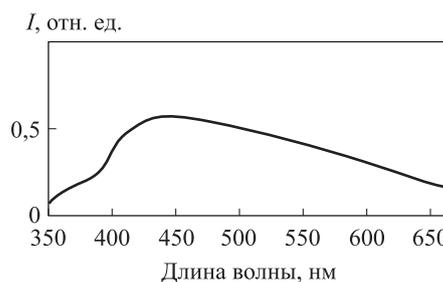


Рис. 1. Спектр флуоресценции Альметьевской нефти для длины волны возбуждения флуоресценции 266 нм [6]

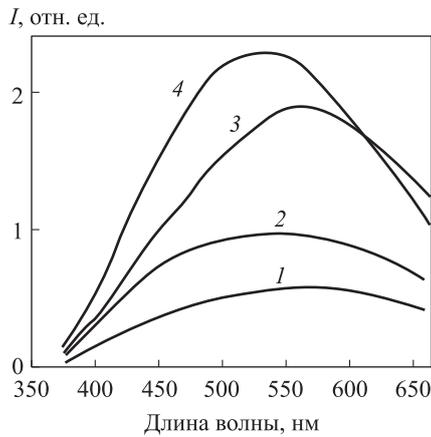


Рис. 2. Спектры флуоресценции нефтей: Arabian medium (1), Basra (2), German (3), Nihian (4) для длины волны возбуждения флуоресценции 355 нм [7]

$$P(\lambda_{fl}) = P_L S_R T_R \frac{\lambda_{ex}}{\lambda_{fl}} \frac{1 - A(\lambda_{ex})}{4\pi} \frac{\varphi}{H^2}, \quad (1)$$

где P_L и λ_{ex} — мощность и длина волны лазерного излучения возбуждения флуоресценции; λ_{fl} — длина волны излучения флуоресценции; $A(\lambda_{ex})$ — альbedo зондируемой поверхности на длине волны возбуждения; φ — квантовый выход флуоресценции; S_R — площадь приемного объектива; H — высота над зондируемой поверхностью; T_R — пропускание приемной системы лидара.

Структура формулы (1) совпадает со структурой формулы для мощности, регистрируемой приемником лазерного локалтора (когда источник, приемник и их оптические оси совмещены и угол поля зрения приемника много больше угла расходимости источника), при вертикальном зондировании плоской поверхности, рассеивающей излучение по закону Ламберта [10]:

$$P = P_L S_R T_R \frac{A}{\pi H^2}, \quad (2)$$

где A — альbedo лоцируемой поверхности.

Формулы (1) и (2) совпадают при $A = \tilde{\varphi}$, где $\tilde{\varphi} = \frac{\lambda_{ex}}{\lambda_{fl}} \frac{1 - A(\lambda_{ex})}{4}$ — эффективный квантовый выход флуоресценции. Физически это понятно, так как флуоресцентное излучение имеет изотропное угловое распределение.

Более сложная схема импульсного моностатического наклонного зондирования показана на рис. 3 (в плоскости XOZ , перпендикулярной направлению полета носителя). Здесь L — флуоресцентный лидар, расположенный на авиационном носителе; S — земная поверхность (считаем ее в среднем плоской); L — наклонное расстояние от флуоресцентного лидара до центра поля зрения приемной оптической системы лидара на земной поверхности; 2α — полный угол расходимости лазерного пучка возбуждения флуоресценции (для простоты считаем его равным полному полю зрения приемной оптической системы лидара); θ — угол между нормалью к плоскости $Z = 0$ и оптической осью флуоресцентного лидара.

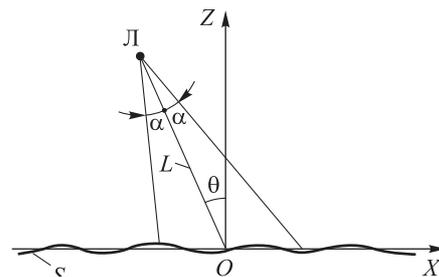


Рис. 3. Схема моностатического наклонного зондирования

В процессе мониторинга продольная развертка обеспечивается за счет полета авиационного носителя, а поперечная развертка — регистрацией импульса лазерно-индуцированной флуоресценции от сектора поля зрения приемной оптической системы лидара на земной поверхности.

Для такой (см. рис. 3) более сложной схемы зондирования неоднородных по своим оптическим характеристикам природных объектов выражение для принимаемой мощности сигнала лазерно-индуцированной флуоресценции может быть записано по аналогии с выражением для мощности лазерного зондирования на основе упругого рассеяния [10].

Для слабо неровной поверхности S ($R_{OX} \text{ctg } \theta \gg \zeta$, $\gamma_x, \gamma_y \ll 1$, где ζ — высота поверхности, $\vec{\gamma} = \{\gamma_x, \gamma_y\}$ — вектор наклонов поверхности) и коаксиальной моностатической наклонной схемы зондирования (источник, приемник и их оптические оси совмещены и лежат в одной плоскости XOZ , перпендикулярной направлению полета носителя) интегральное выражение для принимаемой мощности лазерно-индуцированного флуоресцентного эхо-сигнала $P(t)$ (с учетом изотропного характера углового распределения флуоресцентного излучения и малости времени жизни возбужденных лазерным излучением молекул по сравнению с временными задержками для схемы зондирования на рис. 3) имеет следующий вид:

$$P(t, \lambda_{fl}) \cong \int_s \frac{\tilde{\varphi}(\vec{R}_O)}{\pi} E_s(\vec{R}_O) E_r(\vec{R}_O) g\left(t - \frac{2L}{c} - \frac{2R_{OX} \sin \theta}{c}\right) d\vec{R}_O, \quad (3)$$

где $\vec{R}_O = \{R_{OX}, R_{OY}\}$ — вектор в плоскости $Z = 0$; $E_s(\vec{R}_O)$, $E_r(\vec{R}_O)$ — освещенности локального участка поверхности, создаваемые излучением, падающим от действительного и фиктивного (с параметрами приемника) источников [10]; $\tilde{\varphi}(\vec{R}_O)$ — пространственное распределение эффективного квантового выхода флуоресценции; $g(t)$ — форма импульса лазерного источника.

Аргумент формы импульса лазерного источника $g\left(t - \frac{2L}{c} - \frac{2R_{OX} \sin \theta}{c}\right)$ описывает задержку регистрируемого флуоресцентного сигнала на трассе флуоресцентный лидар–текущая точка на поверхности–флуоресцентный лидар.

Анализ реализации регистрируемого флуоресцентного сигнала $P(t, \lambda_{fl})$ потенциально позволяет восстановить из данных измерений пространственное распределение эффективного квантового выхода флуоресценции $\tilde{\varphi}(\vec{R}_O)$ на земной поверхности.

Преобразуем выражение (3). Считаем, что лазерный пучок (возбуждения флуоресценции) и поле зрения приемной оптической системы имеют вид одинаковых конусов, а именно: $E_s(\vec{R}_O) = E_{SO} \cos \theta$ в пределах лазерного пятна на земной поверхности S (E_{SO} — освещенность от лазерного источника в плоскости, перпендикулярной оптической оси флуоресцентного лидара); $E_s(\vec{R}_O) = 0$

вне лазерного пятна; $E_r(\vec{R}_O) = E_{rO} \cos \theta$ в пределах поля зрения приемной оптической системы на поверхности S (E_{rO} — освещенность от фиктивного источника (с параметрами приемника лидара) в плоскости, перпендикулярной оптической оси фиктивного источника); $E_r(\vec{R}_O) = 0$ вне поля зрения приемной оптической системы. Тогда из (3) получаем

$$P(t, \lambda_{fl}) \cong \frac{E_{SO} E_{rO} \cos^2 \theta}{\pi} \int_S \tilde{\varphi}(R_{OX}, R_{OY}) g\left(t' - \frac{2R_{OX} \sin \theta}{c}\right) dR_{OX} dR_{OY} = \\ = \frac{E_{SO} E_{rO} \cos^2 \theta}{\pi} \int_{S_{OX}} \tilde{\varphi}_x(R_{OX}) g\left(t' - \frac{2R_{OX} \sin \theta}{c}\right) dR_{OX}, \quad (4)$$

где $t' = t - \frac{2L}{c}$; $\tilde{\varphi}_x(R_{OX}) = \int_{S_{OY}} \tilde{\varphi}(R_{OX}, R_{OY}) dR_{OY}$; S_O — часть поверхности S , освещенной источником.

При небольшом размере δR_y лазерного пятна (возбуждения флуоресценции) вдоль оси OY (таком, что $\tilde{\varphi}(R_{OX}, R_{OY})$ практически не меняется в пределах δR_y) имеем $\tilde{\varphi}_x(R_{OX}) = \tilde{\varphi}(R_{OX}) \delta R_y$.

Теперь после ряда преобразований (4) упрощается:

$$F(\tau) = \int_a^b \tilde{\varphi}(R_{OX}) \tilde{g}(\tau - R_{OX}) dR_{OX}, \quad (5)$$

где $\tau = \frac{ct'}{2 \sin \theta}$; $F(\tau)$ — приведенный измеренный сигнал; $F(\tau) = \frac{P(\tau, \lambda_{fl}) \pi}{\delta R_y E_{SO} E_{rO} \cos^2 \theta}$; $\tilde{g}(\tau)$ — приведенная (к зависимости от τ) форма импульса лазерного источника; (a, b) — область интегрирования по R_{OX} , соответствующая поверхности, освещенной лазерным источником; $\tilde{\varphi}(R_{OX})$ — пространственное распределение эффективного квантового выхода флуоресценции зондируемой поверхности вдоль оси OX .

Лазерный моноимпульсный флуоресцентный метод мониторинга нефтяных загрязнений. При зондировании земной поверхности моноимпульсным методом приемник флуоресцентного лидара регистрирует временную реализацию сигнала лазерно-индуцированной флуоресценции от сектора поля зрения приемной оптической системы лидара на земной поверхности.

Анализ этой временной реализации потенциально позволяет определить пространственное распределение квантового выхода флуоресценции $\varphi(\vec{R}_O)$ на поверхности Земли и выявить участки с высоким значением $\varphi(\vec{R}_O)$ (с нефтяными загрязнениями, вызванными утечками нефти). Однако эта задача является сложной, поскольку полученное выражение (5) — это интегральное уравнение первого рода типа свертки; здесь в левой части стоит измеряемый сигнал, а в правой части под интегралом — искомая функция $\tilde{\varphi}(R_{OX})$.

числяется величина $F_{\text{mod}}(\tau_i, a_0, a_1, a_2)$) и ищется вектор параметров $\vec{A} \in M$, минимизирующий невязку $\Delta(a_0, a_1, a_2)$. Этот вектор параметров называется квази-решением системы уравнений (7). Таким образом, квази-решение находится из условия

$$\Delta(\vec{A}) = \inf_{\vec{A} \in M} \sum_{i=1}^n [F_{\text{meas}}(\tau_i) - F_{\text{mod}}(\tau_i, a_0, a_1, a_2)]^2, \quad (9)$$

где $\inf_{\vec{A} \in M} \rho$ — точная нижняя граница ρ при различных значениях вектора параметров \vec{A} , принадлежащих области M (области, ограниченной значениями параметров a_0, a_1, a_2 , определяемых физическим смыслом решаемой задачи).

Таким образом, задача подбора квази-решения системы уравнений (7) может быть сведена к поиску минимума функции $\Delta(a_0, a_1, a_2)$ на некоторой ограниченной области значений параметров a_0, a_1, a_2 , определяемой физическим смыслом решаемой задачи.

Вид функции невязки $\Delta(a_0, a_1, a_2)$ представлен на рис. 4 для $a_2 = 0,025$.

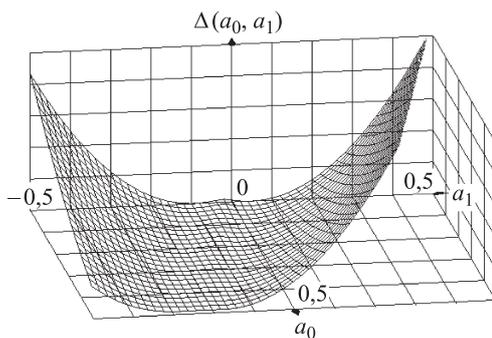


Рис. 4. Вид функции невязки

Из рис. 4 следует, что функция невязки имеет не простой вид для поиска глобального минимума.

Для поиска глобального минимума в принципе можно использовать просто метод перебора в области значений параметров a_0, a_1, a_2 . Однако это приводит к очень большому времени вычислений. Поэтому применяют более эффективные алгоритмы поиска решений. В настоящей работе использован метод роя частиц — поисковый

алгоритм, позволяющий с высокой эффективностью решать сложные оптимизационные задачи [13].

На начальной стадии алгоритма генерируется рой частиц: набор частиц, случайно разбросанных (с равномерным распределением) по всей области поиска, со случайными скоростями (изменениями положения частицы) и вычисляются лучшее значение целевой функции и соответствующее ему лучшее положение частицы в рое.

Метод роя частиц оптимизирует функцию, поддерживая популяцию возможных решений, называемых частицами, и перемещая эти частицы в пространстве решений согласно простой формуле. Перемещения подчиняются принципу наилучшего найденного в этом пространстве положения, которое постоянно меняется при нахождении частицами более выгодных положений.

Для оценки погрешности определения пространственного распределения эффективного квантового выхода флуоресценции зондируемой поверхности моноимпульсным методом проводилось математическое моделирование.

Математическое моделирование погрешности определения пространственного распределения эффективного квантового выхода флуоресценции зондируемой поверхности моноимпульсным методом. При проведении математического моделирования полагали, что число частиц равно 10 000 (оптимальное значение между точностью и временем счета). Использовалась модификация канонического алгоритма роя частиц (притягательно-отталкивающий алгоритм [13]). Коэффициент собственной скорости полагался равным 0,7298, коэффициент собственного лучшего значения 1,49618, коэффициент глобально лучшего значения 1,49618 (рекомендуемые значения в [13]). Минимальное относительное изменение значения целевой функции между итерациями принималось равным 10^{-8} %. Полученные в результате работы алгоритма решения усреднялись по 100 значениям (оптимальное усреднение между точностью и временем счета). Значение n — число измерений задавалось от 4 до 8. Диапазон изменений параметров a_0, a_1, a_2 : $a_0 = 0 \dots 0,5$; $a_1 = -0,5 \dots 0,5$; $a_2 = -0,5 \dots 0,5$. Диапазон изменений R_{OX} от 100 до 300 м (полагалось, что энергетический потенциал флуоресцентного лидара достаточный для приема сигнала с таких расстояний). Шум измерения при математическом моделировании полагался нормальным с нулевым средним значением. Относительное среднеквадратическое значение шума измерения задавалось в диапазоне от 0 до 5 %.

Форма импульса лидара полагалась гауссовой:

$$\tilde{g}(\tau) = \exp\left\{-\frac{t^2}{\tau_s^2}\right\},$$

где τ_s — длительность импульса локатора. Тогда для функции $\tilde{g}(\tau)$ имеем

$$\tilde{g}(\tau) = \exp\left\{-\frac{\tau^2}{R_S^2}\right\},$$

где $R_S = \frac{c\tau_s}{2 \sin \theta}$ — пространственная протяженность импульса локатора на зондируемой поверхности.

На рис. 5 приведены примеры реализаций для восстановленных пространственных распределений эффективного квантового выхода флуоресценции зондируемой поверхности $\tilde{\varphi}(R_{OX})$ (поперек направления полета носителя).

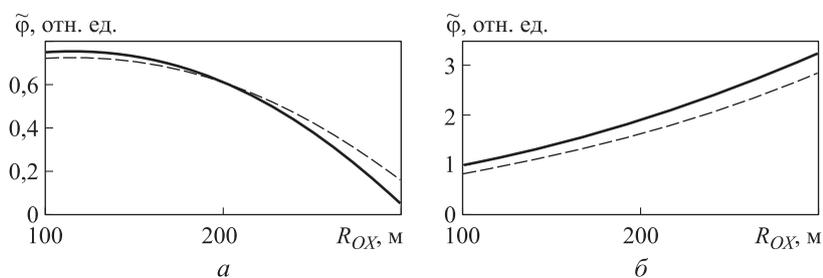


Рис. 5. Примеры восстановленных пространственных распределений $\tilde{\varphi}(R_{OX})$

На рис. 5 приведены два примера заданных модельных распределений эффективного квантового выхода флуоресценции зондируемой поверхности $\tilde{\varphi}(R_{OX})$ и восстановленных (из лазерных флуоресцентных измерений для среднеекватратического значения шума измерения 1,5 % и числе измерений $n = 8$) методом поиска квазираешений пространственных распределений. При моделировании пространственная протяженность импульса $R_S = 150$ м. Заданные модельные значения показаны на рис. 5 сплошными (для рис. 5, а — $a_0 = 0,5$; $a_1 = 0,45$; $a_2 = -0,2$; для рис. 5, б — $a_0 = 0,4$; $a_1 = 0,35$; $a_2 = 0,2$), а восстановленные — штриховыми линиями.

Отметим, что на рис. 5 видны кривые для восстановленных пространственных распределений эффективного квантового выхода флуоресценции. Это связано с тем, что ищется не само пространственное распределение, а коэффициенты разложения для его модельного представления (6). При этом само модельное представление (6) может быть более сложным и зависеть не от трех, а от произвольного числа параметров (конечно, чем больше параметров, тем, как правило, с большими ошибками восстанавливаются значения параметров).

В результате математического моделирования (см. рис. 5) выявлено, что при наличии шума измерения с относительным среднеекватратическим значением 1,5 % восстановленное пространственное распределение удовлетворительно согласуется с заданным. Таким образом, метод квазираешений позволяет по временной реализации лазерно-индуцированного флуоресцентного сигнала восстанавливать пространственное распределение эффективного квантового выхода флуоресценции в поле зрения приемной оптической системы лидара.

В табл. 1, 2 приведены относительные (в процентах) погрешности определения параметров a_0, a_1, a_2 (определяющих пространственное распределение эффективного квантового выхода флуоресценции на земной поверхности) для двух методов поиска квазираешений — метода полного перебора (с дискретом перебора 10^{-3} для каждого параметра) и метода роя частиц (по 10^2 испытаниям). В таблицах приведено также время вычислений (конечно, время вычислений зависит от характеристик процессора, но приведенные данные показывают соотношение между объемами вычислений для методов полного перебора и роя частиц).

Таблица 1

Погрешности определения параметров a_0, a_1, a_2 для данных рис. 5, а

Параметр	Погрешность, %	
	Метод полного перебора	Метод роя частиц
a_0	1,0	6,7
a_1	1,3	9,2
a_2	1,5	5,3
Время вычислений	10 ч 27 мин 59 с	50 мин 40 с

В табл. 1 приведены погрешности определения параметров a_0, a_1, a_2 для данных, одна из реализаций которых показана на рис. 5, а, а в табл. 2 — для данных, для которых одна из реализаций приведена на рис. 5, б.

Погрешности определения параметров a_0 , a_1 , a_2 для данных рис. 5, б

Параметр	Погрешность, %	
	Метод полного перебора	Метод роя частиц
a_0	25,0	15,9
a_1	37,4	23,8
a_2	20,0	9,5
Время вычислений	9 ч 37 мин 24 с	1 ч 00 мин 02 с

Результаты, приведенные на рис. 5 и в табл. 1, 2, указывают на то, что лазерный моноимпульсный флуоресцентный метод мониторинга позволяет удовлетворительно (с погрешностью определения коэффициентов разложения до 20...30 %) восстанавливать пространственное распределение эффективного квантового выхода флуоресценции зондируемой поверхности. Анализ этого распределения дает возможность определить местоположение участков поверхности с высоким уровнем лазерно-индуцированной флуоресценции. При этом использование метода роя для поиска квази решений позволяет сократить требуемое время вычислений примерно в 10 раз по сравнению с методом полного перебора. При регистрации лазерно-индуцированной флуоресценции в нескольких спектральных диапазонах можно решить задачу идентификации [14], т. е. определить, какие участки являются участками с нефтяным загрязнением.

Заключение. Таким образом, исследованы возможности лазерного моноимпульсного флуоресцентного метода мониторинга участков нефтяных загрязнений и утечек нефти на земной поверхности. С помощью математического моделирования выявлено, что использование метода поиска квази решений для анализа регистрируемого сигнала от земной поверхности позволяет в условиях шумов измерения удовлетворительно восстанавливать пространственное распределение эффективного квантового выхода флуоресценции зондируемой поверхности в секторе обзора приемной системы лидара (погрешность составляет 20...30 %). Использование метода роя для поиска квази решений сокращает требуемое время вычислений примерно в 10 раз по сравнению с методом полного перебора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация Земли и леса. М.: Геолидар, Геоскосмос; Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, 2007. 230 с.
2. Сазонникова Н.А. Повышение эффективности обнаружения при лазерном зондировании поверхности // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 3-2 (19). С. 219–226.
3. Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 528 с.

4. Zhang J., Hoffman A., Kane A., Lewis J. Development of pipeline leak detection technologies // 10th Int. Pipeline Conf. Vol. 1. Design and Construction; Environment; Pipeline Automation and Measurement. Calgary, Alberta, Canada, 2014. P. 1–8.
5. Measures R.M. Laser remote sensing. Fundamentals and applications. Krieger Publishing Company, 1992. 510 p.
6. Экспериментальные исследования спектров флуоресценции природных образований и нефтяных загрязнений / Ю.В. Федотов, О.А. Матросова, М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев // Наука и образование: научное издание. 2011. № 11.
7. Patsayeva S., Yuzhakov V., Varlamov V., et al. Laser spectroscopy of mineral oils on the water surface // EARSel Proceeding. 2000. No. 1. P. 106–114.
8. Матросова О.А. Методы контроля нефтяных загрязнений земной поверхности, основанные на явлении лазерно-индуцированной флуоресценции. Дисс. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 178 с.
9. Гришин А.И., Матвиенко Г.Г., Харченко О.В., Тимофеев В.И. Исследование флуоресценции растений при возбуждении излучением второй гармоники YAG:Nd-лазера // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 7. С. 806–812.
10. Основы импульсной лазерной локации / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 572 с.
11. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.
12. Воскобойников Ю.Э., Преображенский Н.Г., Седельников А.Н. Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике. Новосибирск: Наука, 1984. 238 с.
13. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 446 с.
14. Федотов Ю.В., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Метод обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в трех узких спектральных диапазонах // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 3. С. 208–212.

Белов Михаил Леонидович — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Белов Алексей Михайлович — инженер НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Городничев Виктор Александрович — д-р техн. наук, начальник отдела НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Белов М.Л., Белов А.М., Городничев В.А. Лазерный моноимпульсный флуоресцентный метод мониторинга нефтяных загрязнений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 6. С. 62–74. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-6-62-74

LASER MONOPULSE FLUORESCENT METHOD OF OIL POLLUTION MONITORING

M.L. Belov

A.M. Belov

V.A. Gorodnichev

belov@bmstu.ru

ekomonit@bmstu.ru

gorod@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper focuses on possible applications of laser monopulse fluorescent method in the field of remote oil pipeline leaks sensing and detection of land oil pollution. The research shows that application of the method of quasi-expansions detection for analysis of fluorescent signals reflected from the land surface makes it possible to reproduce the spatial distribution of effective quantum yield of probed surface fluorescence in the sight of lidar receiving system. With the measurement error at the level of 1.5 % the error of output data is 20...30 %. The analysis of spatial distribution stated above allows us to locate the surface areas with the highest level of laser-induced fluorescence. The application of swarm optimization method for quasi-expansions detection instead of the method of complete enumeration reduces the calculation time approximately ten times. The processing of laser-induced fluorescence in several spectrum ranges permits to detect the oil-polluted land areas

Keywords

Monitoring of oil pollution, laser-induced fluorescence, monopulse method, land surface

Received 06.06.2018

© BMSTU, 2018

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant no. 13.7377.2017/BCh)

REFERENCES

- [1] Medvedev E.M., Danilin I.M., Mel'nikov S.R. Lazernaya lokatsiya Zemli i lesa [Laser location of Earth and forest]. Moscow, Geolidar Publ., Geoskosmos Publ.; Krasnoyarsk, Sukachev Institut of Forest SB RAS Publ., 2007. 230 p.
- [2] Sazonnikova N.A. The detecting improvement by laser surface sounding. *Vestnik Samar'skogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2009, no. 3-2 (19), pp. 219–226 (in Russ.).
- [3] Kozintsev V.I., Orlov V.M., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. Optiko-elektronnyye sistemy ekologicheskogo monitoringa prirodnoy sredy [Optoelectronic systems for ecologic environment monitoring]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 528 p.
- [4] Zhang J., Hoffman A., Kane A., Lewis J. Development of pipeline leak detection technologies. *10th Int. Pipeline Conf. Vol. 1. Design and Construction; Environment; Pipeline Automation and Measurement*. Calgary, Alberta, Canada, 2014. P. 1–8.
- [5] Measures R.M. Laser remote sensing. Fundamentals and applications. Krieger Publishing Company, 1992. 510 p.

- [6] Fedotov Yu.V., Matrosova O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Kozintsev V.I. Experimental research of fluorescent spectrums of natural formations and oil pollution. *Nauka I Obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2011, no. 11 (in Russ.).
- [7] Patsayeva S., Yuzhakov V., Varlamov V., et al. Laser spectroscopy of mineral oils on the water surface. *EARSeL Proceeding*, 2000, no. 1, pp. 106–114.
- [8] Matrosova O.A. Metody kontrolya neftyanykh zagryazneniy zemnoy poverkhnosti, osnovannye na yavlenii lazerno-indutsirovannoy fluorestsentsii. Diss. kand. tekhn. nauk [Methods for monitoring oil pollution of Earth surface based on laser-induced fluorescence. Cand. tech. sc. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013. 178 p.
- [9] Grishin A.I., Matvienko G.G., Kharchenko O.V., Timofeev V.I. Investigation of the plant fluorescence induced by the biharmonic of a Nd:YAG laser. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 1997, vol. 10, no. 7, pp. 503–506.
- [10] Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. Osnovy impul'snoy lazernoy lokatsii [Fundamentals of pulse laser location]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 572 p.
- [11] Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. Metody resheniya nekorrektnykh zadach [Methods for solving incorrect problems]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 288 p.
- [12] Voskoboynikov Yu.E., Preobrazhenskiy N.G., Sedel'nikov A.N. Matematicheskaya obrabotka eksperimenta v molekulyarnoy gazodinamike [Mathematical processing of experiment in molecular gas dynamics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 238 p.
- [13] Karpenko A.P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlenyye prirodoy [Modern search optimization algorithms. Algorithms inspired by nature]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 446 p.
- [14] Fedotov Yu.V., Matrosova O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Method of detection of oil pollution on the earth's surface based on fluorescence radiation recording within three narrow spectral bands. *Optika atmosfery i okeana*, 2013, vol. 26, no. 3, pp. 208–212 (in Russ.).

Belov M.L. — Dr. Sc. (Eng.), Leading Research Fellow, Scientific Research Institute of Radioelectronic and Laser Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Belov A.M. — engineer, Scientific Research Institute of Radioelectronic and Laser Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Gorodnichev V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Head of Scientific Research Institute of Radioelectronic and Laser Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Belov M.L., Belov A.M., Gorodnichev V.A. Laser Monopulse Fluorescent Method of Oil Pollution Monitoring. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 6, pp. 62–74 (in Russ.).
DOI: 10.18698/0236-3933-2018-6-62-74