

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.463.5:531.719.3

В.Л. Сергеев, В.С. Шаманаев

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ СИГНАЛОВ ГИДРООПТИЧЕСКОГО АВИАЛИДАРА

Рассмотрен нетрадиционный метод решения обратной задачи лазерного зондирования верхнего слоя моря, имеющего светорассеивающие слои. Предлагается дискретную форму эхосигнала лидара заменять его параметрической моделью. Для оценки параметров модели, описывающих глубину нахождения и отражательную способность подводных слоев, предложена модификация метода Гаусса – Ньютона. Показаны преимущества данной модификации по устойчивости решения и его погрешностям.

В задачах лазерного зондирования атмосферных образований исследователь сталкивается с очень большим диапазоном изменения их оптических характеристик. Для решения этих задач в настоящее время уже развит ряд подходов по обращению уравнения лазерного зондирования атмосферы. Иная ситуация сложилась в зондировании океана, особенно с летательных аппаратов. Высокая оптическая плотность воды и большее, чем в атмосфере, количество параметров светорассеяния затрудняют до сих пор формулирование удобного для практического применения уравнения зондирования. Имеющиеся попытки носят частный характер (например, [1]). В то же время по сравнению с атмосферой диапазон вариаций оптических свойств воды открытого моря меньше. Поэтому во многих исследовательских ситуациях удастся использовать простую модель лидарного сигнала [2]. Физически она содержит три составляющие: отражение от границы раздела воздух – вода; рассеянный на морских гидрозолях и молекулах воды быстроспадающий сигнал от приблизительно однородной водной толщи; увеличивающийся более или менее быстро импульс, обусловленный рассеянием на подводной аномалии. Такой моделью может быть слой повышенной концентрации частиц на глубине температурного скачка, «облако» фитопланктона, косяк рыбы, наконец, дно моря. Глубина нахождения такой аномалии, обнаруживаемой лидаром, может изменяться от единиц до десятков метров. Эти факторы упрощают моделирование сигнала и проведение дальнейших вычислительных операций с параметрами модели, а не с самим сигналом.

При зондировании моря возникают еще две задачи, осложняющие проблему. Глубина проникновения лазерного импульса в общем невелика, и на современном техническом уровне регистрации и обработки сигналов мы имеем в них небольшое количество отсчетов. Более того, часто возникают пропуски данных по физическим причинам. На взволнованной поверхности моря имеются микроплощадки, которые дают зеркальное отражение луча в приемный телескоп. Происходит либо перегрузка фотодетектора, либо превышение входного диапазона сигналов аналого-цифрового преобразователя, что приводит к пропуску правильных данных.

Предложенный в [2] способ построения модели (идентификации) сигналов лидара при гидрооптическом зондировании верхнего слоя моря основан на модели вида

$$S_t = \alpha_1 / (1 + \alpha_3 (t - \alpha_5)^2) + \alpha_2 / (1 + \alpha_4 (t - \alpha_6)^2). \quad (1)$$

Здесь начало координат находится на границе раздела воздух – вода, и время t идет от нее в глубь воды; α_1, α_2 – амплитуды первого и второго импульсов; α_5 и α_6 их центры; α_3, α_4 – характеризуют крутизну первого и второго импульсов соответственно. Особый интерес представляет группа параметров $\alpha_2, \alpha_4, \alpha_6$, характеризующих аномалии – слой замутняющих гидрозолей, дно, косяк рыбы и т. п. Определение параметров $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6)$ [2] проводится методом Гаусса – Ньютона по одиночным реализациям $\tilde{S}_{t,k}$, где k – номер эхосигнала.

В условиях малых выборок и пропуска данных, вызванных отмеченными выше физическими и техническими причинами, метод Гаусса-Ньютона часто приводит к неустойчивым оценкам параметров и существенным ошибкам. Известные методы получения устойчивых статистических выводов и, в частности, оценок параметров прямо либо косвенно связаны с учетом дополнительной информации о параметрах α [3]. В данном направлении развиваются два подхода: детерминированный и вероятностно-статистический. При детерминированном подходе предполагается, что дополнительная информация известна в виде некоторых оценок β^* параметров модели (1), которые получены при обработке одиночных реализаций эхосигналов, аналогичных исследуемому. Существенным моментом здесь является то, что заранее устанавливается вид зависимости β^* от вектора параметров α . Как правило, берется линейная зависимость.

При вероятностно-статистическом подходе предполагается, что параметры α — это случайные величины с известным распределением. В качестве априорного распределения α часто используется нормальное распределение со средним значением β и матрицей ковариаций W .

В реальных условиях при зондировании с борта самолета использование этих методов вызывает серьезные затруднения, связанные с подбором аналогов к обрабатываемому сигналу, определением вида зависимости между β^* и α , выяснением вида распределения α и т. п.

Нами предлагается новый метод, свободный от перечисленных выше ограничений, позволяющий в достаточной общей постановке решать данную задачу.

Для получения оценок параметров модели (1) рассмотрим две взаимосвязанные системы:

$$\tilde{S}_i = \tilde{J}_i = f(t_i, \alpha) + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$\beta_{j\kappa}^* = \varphi_j(\alpha_j) + \eta_{j\kappa}, \quad j = \overline{1, m}, \quad \kappa = \overline{1, l}. \quad (3)$$

Система (2) — это дискретная модель эхосигнала лидара вида (1), где α — общий вид вектора параметров $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$.

Система (3) — это дискретная модель дополнительной информации, заданной в виде оценок $\beta_{j\kappa}^*$ параметров α_j , $j = \overline{1, m}$, связанных с искомыми параметрами α посредством функций φ_j , $j = \overline{1, m}$. Неизвестные функции $\varphi_j \in D$, $j = \overline{1, m}$, где D — пространство однозначных функций. Переменные ε_i , $\eta_{j\kappa}$ — случайные величины с нулевым средним значением и ограниченными дисперсиями.

Оценки $\beta_{j\kappa}^*$ в (3) могут представлять собой как значения параметров модели эхосигналов лидара (1), полученных в контролируемых условиях для определенных типов аномалий, так и значения этих параметров в серии эхосигналов $\tilde{S}_{i\kappa}$, $\kappa = \overline{1, l}$, вычисленных в ходе проведения эксперимента.

Формально с использованием моделей (2), (3) оценки α^* параметров α в некоторой точке $\tilde{\alpha}$ могут быть представлены в виде [4]

$$\alpha^* = \arg \min (\Phi_\alpha = J_\alpha + Q_\alpha), \quad (4)$$

где $J_\alpha = \sum_{i=1}^n (\tilde{J}_i - f(t_i, \alpha))^2 = \|\tilde{Y} - F_\alpha\|^2$ — гауссовский функционал ошибок; $\|X\|$ — норма x ;

$$Q_\alpha = \sum_{j=1}^m \sum_{\kappa=1}^l K \left(\frac{\tilde{\alpha}_j - \beta_{j\kappa}^*}{h} \right) (\beta_{j\kappa}^* - \varphi_j(\alpha_j))^2$$

— функционал суммарных взвешенных квадратов ошибок в задании дополнительной информации $\beta_{j\kappa}^*$ (3). Здесь $K(\cdot) > 0$ — весовая функция, используемая в качестве нечеткой, связанной с неопределенностью функций φ_j , $j = \overline{1, m}$, модели описания дополнительной информации (3). Параметр h указывает степень несоответствия дополнительных значений параметров $\beta_{j\kappa}^*$ оцениваемым параметрам α_j , $j = \overline{1, m}$, $\kappa = \overline{1, l}$, т.е. степень неточности равенства $\beta_{j\kappa}^* = \alpha_j$. При выборе в качестве весовой функции $K(\cdot)$ убывающей колоколообразной функции с центром в точке $\beta_{j\kappa}^*$ роль параметра h имеет физически ясную картину. Чем больше h , тем сильнее несоответствие $\beta_{j\kappa}^*$ относительно параметров α_j , тем более неточна дополнительная информация. При $h = 0$ дополнительная информация точная.

Задача (4) сводится к решению систем нелинейных уравнений вида

$$\frac{\partial \Phi_\alpha}{\partial \alpha_j} = 0, \quad j = \overline{1, m}, \quad (5)$$

и в вычислительном плане представляет довольно трудоемкую процедуру. В этой связи, как и в методе Гаусса-Ньютона [2], целесообразно свести нелинейную задачу (5) к последовательности линейных задач путем линеаризации систем (2), (3) в окрестности точки α^0 — начального приближения параметров α .

Для вычисления очередного приближения параметров α имеет место рекуррентная формула

$$\begin{aligned} \alpha^{p+1} &= \alpha^p + \gamma^p \cdot \Delta \alpha^p, \quad p = 0, 1, 2, \dots; \\ \Delta \alpha^p &= \alpha - \alpha^p, \quad \gamma^p \equiv 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь добавка $\Delta\alpha^p$ на каждом шаге p вычисляется путем решения системы линейных уравнений (СЛУ) вида

$$(F^T F + K)^p \Delta\alpha^p = (F^T \varepsilon + \sum_{j=1}^l K_j \beta_j^*), \quad (7)$$

где $p = 0, 1, 2, \dots$. В формуле (7)

$$(F^T F)^p = \left(\sum_{\kappa=1}^l \left(\frac{\partial f(t_\kappa, \alpha)}{\partial \alpha_i} \right)^p \left(\frac{\partial f(t_\kappa, \alpha)}{\partial \alpha_j} \right)^p, i, j = \overline{1, m} \right)$$

— произведение матриц частных производных модельного сигнала лидара (2) по параметрам α . Индекс p — номер шага — означает, что производные вычисляются в точке $\alpha = \alpha^p, p = 0, 1, 2, \dots$

$$F^T \varepsilon = \left(\sum_{\kappa=1}^l \left(\frac{\partial f(t_\kappa, \alpha)}{\partial \alpha_i} \right)^p (Y_\kappa - f(t_\kappa, \alpha))^p, i = \overline{1, m} \right)$$

— вектор-столбец свободных членов. Функционал

$$\sum_{j=1}^l K_j \tilde{\beta}_j^* = \left(\sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^m K \left(\frac{\alpha_i^p - \beta_{ij}^*}{h} \right) (\beta_{ij}^* - \alpha_i^p), i = \overline{1, m} \right)$$

— вспомогательный вектор-столбец свободных членов, полученный за счет учета дополнительной информации (3).

$$\tilde{K} = \text{diag} (\omega_{11}, \omega_{22}, \dots, \omega_{mm}),$$

$$\omega_{ii} = \sum_{\kappa=1}^l K \left(\frac{\alpha_i^p - \beta_{ij}^*}{h} \right), i = \overline{1, m}$$

— диагональная матрица весов ω_{ii} , полученная, как и вектор $\sum_{j=1}^l K_j \tilde{\beta}_j^*$ при учете информации (3).

Для доказательства утверждения (7) достаточно подставить линеаризованную систему (2), (3) в функционал (4), взять производные по вектору параметров $\Delta\alpha$ и приравнять их нулю.

Отметим, что предложенный метод (6) определения параметров α (1) более устойчив по сравнению с методом Гаусса-Ньютона в том смысле, что полученная СЛУ (7) имеет решение (за счет матрицы \tilde{K}) и в случае вырожденной либо плохообусловленной матрицы $F^T F$. При некоторых условиях матрица $F^T F + \tilde{K}$ близка к матрице $F^T F + \beta E$, предложенной А.Н. Тихоновым [5] для регуляризации решения СЛУ ($\alpha > 0, E$ — единичная матрица).

Действительно, используя в качестве весовой функции K приближение вида $K(u_i) = \exp\{-u_i^2\}$ при $(\alpha_i^p - \beta_{ij}^*) / h \gg 1, l = 1$, получим, что $K(u_i) \approx \beta, i = \overline{1, m}$ и $K \approx \beta E, \beta$ — мало.

Следует также отметить, что задача выбора управляющего параметра h в ядре $K(\cdot)$ аналогична задаче выбора параметра регуляризации β и может быть решена известными методами [5] как на каждом шаге p , так и один раз в начале итерационного процесса (6).

Относительные погрешности восстановления амплитуд α_1 и α_2 сигналов S_1^1 и S_1^2 , а также положения их центров α_5 и α_6 методом Гаусса-Ньютона (ГН) и модифицированным методом Гаусса-Ньютона (МГН). Вид сигналов приведен на рис. 1—4

Метод	α_1		α_2		α_5		α_6	
	S_1^1	S_1^2	S_1^1	S_1^2	S_1^1	S_1^2	S_1^1	S_1^2
ГН	$4,4 \cdot 10^{-4}$	0,3	0,37	1,14	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$
МГН	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	0,15	0,14	$1 \cdot 10^{-2}$	0,01	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$

Результаты, иллюстрирующие эффективность предложенного алгоритма (6), приведены на рис. 1–4 и в таблице. Их основу составили экспериментальные данные, полученные в ходе различных полетов, в том числе описанных в [6].

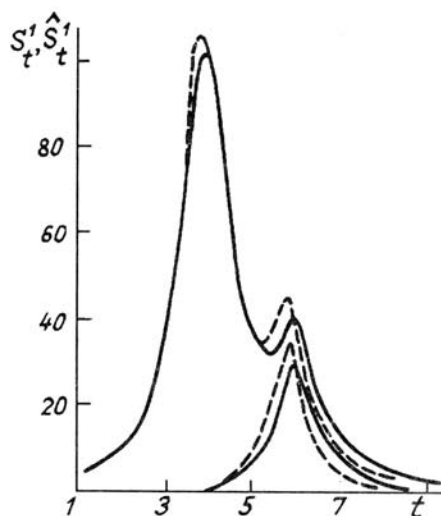


Рис. 1. Восстановление лидарных сигналов при наличии подводных светорассеивающих образований методом Гаусса–Ньютона. По оси абсцисс — дискретное время t с шагом 25 нс (2,8 м по глубине). По оси ординат — относительные единицы. Сплошная линия — исходный сигнал, штриховая — восстановленный. Ограничений по входному сигналу не имеется

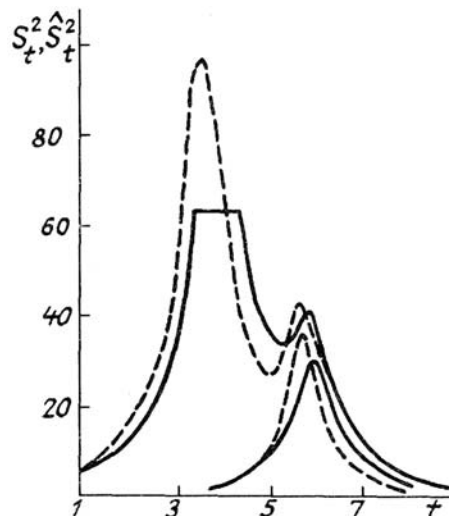


Рис. 2. То же, что и на рис. 1. Сигнал от поверхности моря имеет ограничение

На рис. 1–2 штриховой линией изображены восстановленные методом Гаусса–Ньютона значения \hat{S}_t^1 и \hat{S}_t^2 экосигналов S_t^1 и S_t^2 (1), изображенных, в свою очередь, сплошной линией. Второй всплеск на кривых S_t^1 и S_t^2 , т.е. импульс непосредственно из-под воды, характеризует аномалию. Истинное поведение аномалии, описываемое второй частью уравнения (1) с центром в точке $t_i = 7$, изображено сплошной линией (одиночный всплеск). Дискретная модель (1) задана в форме (2) при $\epsilon_i = 0$, $i = \overline{1, 9}$.

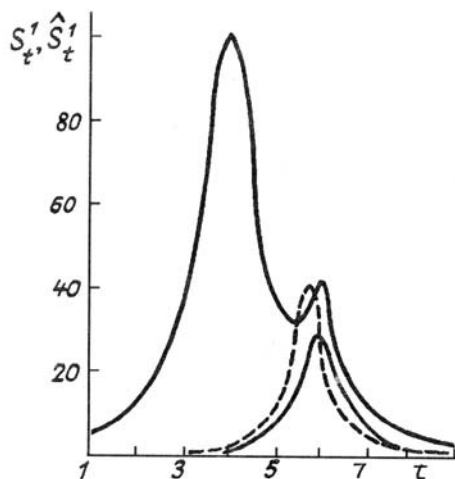


Рис. 3. Восстановление лидарных сигналов модифицированным методом Гаусса–Ньютона с учетом дополнительной информации (3). Обозначения те же, что и на рис. 1. Ограничений по входному сигналу не имеется

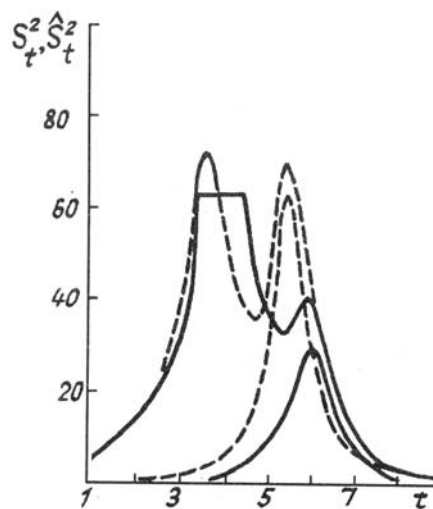


Рис. 4. То же, что и на рис. 3. Сигнал от поверхности моря имеет ограничение

На рис. 3–4 штриховой линией нанесены восстановленные с помощью модифицированного метода Гаусса–Ньютона (6) значения \hat{S}_t^1 и \hat{S}_t^2 и сплошной — экосигналов S_t^1 и S_t^2 .

В качестве дополнительной информации (3) использовались приближенные значения β_{jk}^* параметров α_j (1) с относительной ошибкой порядка 20–30%, т. е.

$$\beta_{jk}^* = \alpha_j + \alpha_j c \eta_{jk}, \quad \kappa = \overline{1, 5}, \quad j = \overline{1, 6}.$$

Здесь η_{jk} — нормально распределенные случайные величины с нулевым средним значением и единичной дисперсией $\sigma_{\kappa} = 1$, $\kappa = \overline{1, 5}$. Параметр c характеризует уровень помех, $c \in (0, 2 \div 0, 3)$.

Второй сигнал S_t^2 , показанный на рис. 2 и 4, отображает ситуацию превышения полезным сигналом входного диапазона аналогоцифрового преобразователя и его отсечку на уровне $S(t) = 63$ единицам кода АЦП. Отсечка изображена ступенькой — сплошная линия, а в дискретной модели (2) отсечка соответствует искаженному значению сигнала в точке $t_4 = 4$, $S(t_4) = 63$.

Из рис. 2 видно, что пропуск одного правильного значения в эхо-сигнале дает значительную ошибку, особенно в оценивании амплитуды аномалии методом Гаусса-Ньютона. Относительная ошибка превышает 100%.

На рис. 4 приведены аналогичные результаты для модифицированного метода Гаусса-Ньютона (6) с привлечением дополнительной информации. Здесь погрешность в оценке амплитуды аномалии составляет примерно 14%.

Значения относительных ошибок восстановления параметров α_1 , α_2 , α_5 , α_6 , характеризующих амплитуды импульсов и положения их центров, приведены в таблице. Из нее видно, что для сигнала с искаженным значением одного отсчета точность восстановления параметров методом Гаусса-Ньютона значительно хуже по сравнению с точностью восстановления сигнала S_t^2 . Предложенный метод (6) в этом смысле дает более устойчивые оценки.

В заключение отметим, что предложенный метод оценивания параметров лидарного эхосигнала позволяет учитывать дополнительную информацию, дает более стабильные результаты по сравнению с методом Гаусса-Ньютона, что приводит к существенному повышению точности оценивания параметров подводных светорассеивающих образований.

1. Пеннер И. Э., Шаманаев В. С. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 7. С. 110–116.
2. Сергеев В. Л., Шаманаев В. С. Статистические задачи интерпретации сигналов лидара при гидрооптическом зондировании в условиях малых выборок. Томск, 1989. 44 с. (Препринт/ИОА СО АН СССР, № 42).
3. Ермаков С. М., Жиглявский А. А. Математическая теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1987. 320 с.
4. Сергеев В. Л. // Моделирование систем информатики (Тезисы докл.). Новосибирск, 1988. С. 103–105.
5. Тихонов А. Н., Арсенин В. А. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.
6. Пеннер И. Э., Самохвалов И. В., Шаманаев В. С. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 12. С. 60-66.

Томский институт автоматизированных систем управления и радиоэлектроники,
Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
г. Томск

Поступила в редакцию
26 сентября 1990 г.

V. L. Sergeev, V. S. Shamanaev. Method of Establishing the Identity of a Hydrooptical Aircraft Lidar Signals.

The paper presents a nontraditional method for solving the inverse problem of sensing upper marine layer with scattering properties stratification. It is suggested to substitute the discrete shape of a lidar return by a parametric model. It is also proposed a version of the Gauss-Newton method for estimation the parameters of the model. It is shown, in addition, that this modification has certain advantages providing better stability of the solution and lower errors.