## I. S. Pesterev Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## A SYSTEM OF PULSE SIGNALS GENERATION FOR EXCITATION OF SUPERWIDEBAND HYDROACOUSTIC TRANSDUCERS

It is considered the concept of a multichannel excitation system for superwideband hydroacoustic transducers of the rod and waveguide types, providing the possibility of short acoustic pulses and signals of complex shape emitting. The principle of electrical excitation signals, forming by the system, is based on the software implementation of solving the synthesis problem for the specified structural parameters of the transducer and the required shape of the acoustic signal followed by digital-analog conversion of the obtained digital data arrays is shown. The control mechanism and functional features of the excitation system are described as well as the results of system testing in a pulse mode taking into account the acoustic load of actual transducers forming the antenna array. Main directions of improving the electronic equipment of the excitation system in order to further performance and output power improvement, the length of the synthesized signals increase and the operating frequency range expanding are specified.

Digital analog signal conversion, superwideband amplifier, pulse signals, frequency characteristics synthesis, superwideband transducer, computer modeling

## УДК 528.8.044.6

В. С. Горяинов, А. А. Бузников Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

В. И. Черноок АО «Гипрорыбфлот»

# Модификация метода базового сигнала

Прозрачность природных вод – важная гидрооптическая характеристика, указывающая на их биопродуктивность и экологическое состояние. Ряд оптически активных компонентов и процессов в толще и на поверхности водоемов определяют поглощение и рассеяние оптического излучения. На практике прозрачность воды характеризуется коэффициентом диффузного ослабления. Восстановление последнего по форме лидарного эхосигнала (временной зависимости интенсивности рассеянного излучения) затруднено необходимостью учитывать широкий ряд внешних и внутренних параметров системы. Для аппроксимации формы эхосигнала функциями, полученными из оптических предположений и содержащими коэффициент диффузного ослабления, требуется большой объем вычислений. Рассматривается аппроксимация эхосигнала простой кусочно-заданной асимметричной гауссовой функцией. Описан процесс численного моделирования, приводятся зависимости параметров функции от значения коэффициента диффузного ослабления.

#### Лидары, удаленное зондирование водной среды, обработка сигналов

Лидарный метод дистанционного зондирования основан на локации водной среды короткими (порядка единиц наносекунд) поляризованными лазерными импульсами. Регистрация временных, спектральных и поляризационных характеристик эхосигнала, т. е. излучения, рассеянного в направлении приемника лидарной системы, позволяет определять широкий ряд параметров водной среды. Один из таких параметров – прозрачность воды, которую формируют процессы рассеяния и поглощения света различными растворенными компонентами и взвесью. Следовательно, измерение прозрачности воды может служить для оценки биопродуктивности и экологического состояния водоема. В соответствии с определением, прозрачность воды характеризуется коэффициентами поглощения *a* и рассеяния *b*, представляющими отношения поглощенной  $\Phi_a$  и рассеянной  $\Phi_s$  доли излучения к полному падающему потоку  $\Phi_i$  в слое воды малой толщины  $\Delta r$  [1]:

$$a \equiv \lim_{\Delta r \to 0} \frac{\Delta(\Phi_a / \Phi_i)}{\Delta r}, \ b \equiv \lim_{\Delta r \to 0} \frac{\Delta(\Phi_s / \Phi_i)}{\Delta r}$$

Сумма этих коэффициентов называется коэффициентом ослабления коллимированного светового пучка:  $c \equiv a + b$ . Коэффициенты выражаются в метрах в минус первой степени.

Поскольку при лидарном зондировании регистрируется рассеянное, а не коллимированное излучение, то шире применяют имеющий ту же размерность коэффициент диффузного ослабления:

$$K_d(z) = -\frac{d[\ln E_d(z)]}{dz} = -\frac{1}{E_d(z)}\frac{dE_d(z)}{dz},$$

где  $E_d(z)$  – нисходящая освещенность на глубине z.

Восстановление коэффициента диффузного ослабления по форме лидарного эхосигнала затрудняет необходимость учитывать большое количество действующих при зондировании параметров самой лидарной системы и внешней среды. По этой причине на практике зачастую прибегают к приближенному описанию формы эхосигнала, при этом в аппроксимирующей функции выбирают величину, указывающую на характеристики среды. Пример такой функции, описывающей мощность эхосигнала  $P_{ap}$  в момент времени *t* содержится в статье [2]:

$$P_{ap}(t) = \frac{A \exp(-K_d c_0 t)}{(2nh + c_0 t)^2}.$$
 (1)

Здесь  $A = \text{const} - \text{амплитудный фактор, в который вкладываются энергия зондирующего импульса, потери энергии при прохождении импульса через поверхность воды, площадь и чувствительность фотоприемника и т. п.; <math>c_0$  – скорость света в вакууме; n – показатель преломления воды; h – длина воздушного участка трассы зондирования (иными словами, высота лидарной системы над водой).

Аппроксимирующая функция при этом выступает в роли базового сигнала, с которым сравниваются реальные значения эхосигнала в тот или иной момент времени. Для этой же цели может использоваться форма сигнала, полученная на участке с однородными по глубине оптическими свойствами.

На рис. 1 показан пример лидарного эхосигнала *P 1* с наложенной аппроксимирующей функцией  $P_{ap}$  3 вида 4. Аппроксимация производится на спаде сигнала, расстояние от максимума выбирается для каждого отдельного случая в зависимости от формы эхосигнала и временного разрешения аналого-цифрового преобразователя, при помощи которого зафиксирован сигнал. В данном случае использовались точки 2 с номерами от  $N_{\rm max}$  + 5 до  $N_{\rm max}$  + 20, где  $N_{\rm max}$  – номер точки с максимальной интенсивностью сигнала.

.....



В [3] приводится аналогичная функция, однако с глубиной под поверхностью воды *z* в качестве аргумента:

$$P_{ap}(z) = \frac{A \exp\left(-K_d z\right)}{\left(nh\frac{\cos\theta_w}{\cos\theta_a} + z\right)^2} + B.$$
 (2)

Здесь авторские обозначения величин, входящих в (1), были для единообразия заменены на использованные в ней. Кроме них в (2) появляется вторая постоянная аппроксимации B = const, а также  $\theta_w$  и  $\theta_a$  – углы между лучом и нормалью к поверхности воды в воде и воздухе соответственно, введенные для учета наклонной трассы зондирования.

Функции (1), (2) получены из оптических закономерностей в приближении малоуглового рассеяния [4]. Помимо суммарного коэффициента диффузного ослабления метод базового сигнала позволяет оценивать относительное изменение показателя рассеяния по глубине (получение абсолютных значений представляет отдельную задачу):

$$b(z) = \ln \left[ P_{ap}(z) / P(z) \right]. \tag{3}$$





Puc. 2

К недостаткам таких функций относятся большой объем вычислений, необходимых для «наложения» кривой на эхосигнал (например, методом наименьших квадратов), а также сильная зависимость результата от выбора участка для аппроксимации (2 на рис. 1) и начального предположения. В связи с этим интерес представляют более простые функции, обеспечивающие сходимость задачи в широком диапазоне форм эхосигнала и начальных предположений. При этом не обязательна связь вида функции с физическими процессами формирования эхосигнала – достаточно лишь наличия в ней параметров, которые стабильно коррелировали бы с изменяющимся коэффициентом  $K_d$ .

В качестве примера можно предложить кусочно-заданную функцию следующего вида:

$$P_{ap}(t) = \begin{cases} \alpha \exp\left(-\frac{t-\tau}{\beta}\right)^2, \ t < \tau, \\ \alpha \exp\left(-\frac{t-\tau}{\kappa\beta}\right)^2, \ t \ge \tau, \end{cases}$$
(4)

где  $\alpha$ ,  $\tau$ ,  $\beta$ ,  $\kappa = \text{const}$ ,  $\kappa > 0$ . Выражение (4) представляет собой гауссову функцию с максимумом в точке  $t = \tau$ , которая убывает медленнее, чем возрастает, за счет коэффициента  $\kappa$ . Последний и предполагается использовать в качестве информативного параметра.

Для проверки зависимости  $\kappa = f(K_d)$  был сформирован массив значений функции (4) со следующими коэффициентами:  $\alpha = 1$ ,  $\tau = 3 \cdot 10^{-8}$  с,  $\beta = 10^{-8}$  с,  $\kappa = 1, 2, ..., 10$  (единицы измерения выбраны из соответствия единиц измерения аргумента *t*). Каждому значению  $\kappa$  соответствовало 10 кривых, различающихся случайной шумовой составляющей. Шум был добавлен для имитации реальных лидарных эхосигналов, а также для успешной работы алгоритма аппроксимации. На рис. 2, *а* показано двумерное распределение значений в массиве, а на рис. 2, *б* приведены примеры графиков функции для различных к:  $1 - \kappa = 3$ ;  $2 - \kappa = 5$ ;  $3 - \kappa = 9$ .

Для каждой кривой в массиве была выполнена аппроксимация функцией (4) с параметром h == 150 м, а затем в пределах каждого значения к рассчитаны медианное значение  $K_d$  и стандартное отклонение. Результаты расчетов показаны на рис. 3. Точки соответствуют медианным значениям  $K_d$ , «усы» – значениям стандартного отклонения  $\sigma$ .

На графике видно резкое уменьшение коэффициента диффузного ослабления по мере роста к. Этому соответствует экспоненциальная зависимость вида

$$K_d(\kappa) = \alpha' \exp(\beta' \kappa) + \gamma',$$
 (5)

где  $\alpha'$ ,  $\beta'$ ,  $\gamma'$  = const, показанная на рис. 3 сплошной кривой.



Для оценки того, как на вид зависимости (5) влияет длина воздушного участка трассы зондирования, подобные расчеты были проведены для двух других значений *h*. Сравнение полученных коэффициентов приведено в таблице.

<i>h</i> , м	$\alpha'$ , $m^{-1}$	β′	$\gamma'$ , $m^{-1}$	$R^2$
150	2.175	-0.986	0.031	0.996
250	2.175	-0.986	0.034	0.996
500	2.175	-0.986	0.035	0.996

В ее последнем столбце приведены значения коэффициента детерминации  $R^2$ , указывающего на точность аппроксимации (усредненные в пределах одного значения к). Как видно из таблицы, с точностью до третьего знака коэффициент детерминации остается постоянным при изменении h. Следовательно, в диапазоне высот от 150 до 500 м и значений к от 1 до 10 значение  $K_d$  может быть определено с использованием кривой, изображенной на рис. 3.

Как было отмечено, метод базового сигнала позволяет получать двумерные распределения относительного коэффициента рассеяния по глубине и номеру сигнала  $b(z, N_s)$ , используя (3). Очевидно, в качестве  $P_{ap}$  могут применяться и значения функции (4). На рис. 4 показан результат обработки массива натурных данных с ее использованием.

Данные были получены при зондировании прибрежных вод о. Сахалин авиационным лидаром [5]. Из (3) следует, что отрицательные значения  $b(z, N_s)$  соответствуют  $P_{ap} < P$ , т. е. в темные области на графике входят точки, где зафиксированное значение сигнала превы сило предсказанное аппроксимирующей функцией. Можно выде-

1. Mobley C. D. Light and water: radiative transfer in natural waters. Academic Press, 1996. 592 p.

2. Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean / A. P. Vasilkov, Y. A. Goldin, B. A. Gureev et al. // Applied Optics. 2001. Vol. 40, № 24. P. 4353–4364.

3. Churnside J. H., Wilson J. J., Tatarskii V. V. Lidar profiles of fish schools // Applied Optics. 1997. Vol. 36, № 24. P. 6011–6020.

4. Пеннер И. Э. Опыт совместного зондирования моря судовым и самолетным лидарами // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6, № 1. С. 107–111.

лить три слоя с повышенным рассеянием: под самой поверхностью, где ощущается взаимодействие воды и воздуха; на глубинах 6...11 м, сформированный, вероятно, скоплением планктона; наконец, показатель рассеяния начинает возрастать ниже 25 м. Пустые столбцы на графике соответствуют сигналам, пропущенным при обработке из-за их шумовой формы.



Все расчеты в статье были выполнены при помощи языка для статистических вычислений *R* [6].

Таким образом, предложенная модификация метода базового сигнала позволит решать те же задачи, что и исходный вариант методики. В то же время замена аппроксимирующей функции устраняет необходимость подбора участка для аппроксимации и снижает строгость требований к первоначальному предположению. Результатом является уменьшение вычислительных затрат и общей трудоемкости метода.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

5. Some results of airborne lidar survey of Sakhalin coastal waters / V. I. Chernook, Yu. A. Goldin, A. I. Boltnev et al. // Proc. of VI Intern. conf. «Current problems in optics of natural waters» (ONW 2011). SPb.: Nauka, 2011. P. 149–152.

6. Core R., Team R. A language for statistical computing // R Foundation for Stat. Comp. Vienna, 2014. URL: http://www.R-project.org.

.....

.....

V. S. Goryainov, A. A. Buznikov Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

V. I. Chernook «Giprorybflot» JSC

MODIFICATION OF THE BASE SIGNAL METHOD

Transparency of natural waters is an important hydro-optical parameter denoting their bioproductivity and ecological status. A number of optically active components and processes both below the water surface and on it control the absorption and scattering of optical radiation. In practice water turbidity can be described by its diffuse attenuation coefficient. Restoring the latter by the shape of lidar returns (i. e. time dependence of the intensity of scattered radiation) is obscured by the need to account a number of factors, both internal and external. To approximate the return shape by functions derived from optical assumptions, cumbersome computations are required. The paper deals with an experience of approximating lidar returns with a piecewise asymmetric Gaussian function. The process of numerical simulation is described along with the dependencies of the function's parameters on the diffuse attenuation coefficient value.

Lidars, remote sensing of water, signal processing

УДК 534.232

Б. Г. Степанов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

# Об излучении коротких акустических сигналов стержневыми преобразователями с фазированным возбуждением их двух частей

Приводятся результаты экспериментальных исследований макетов антенн, составленных из стержневых преобразователей с амплитудно-фазовым возбуждением двух частей (секций) пьезостержня в соответствии с решением задачи синтеза. Реализация такого возбуждения осуществляется с помощью программно управляемой системы возбуждения и позволяет сформировать близкую к равномерной амплитудно-частотную характеристику излучения и практически линейную фазочастотную характеристику излучения в полосе пропускания порядка 2 октав. Показана возможность излучения в этой полосе перестраиваемых по частоте ультракоротких импульсов, а также возможность управления фазочастотной характеристикой излучения. Рассматривается возможность формирования сигналов, подобных сигналам китообразных, с помощью системы возбуждения и стержневых преобразователей с амплитудно-фазовым возбуждением. Дается сравнительная оценка расчетных и экспериментальных данных. Отмечается возможность сохранения требуемых характеристик излучения при изменении параметров пассивных накладок и нагруженности излучающих апертур преобразователей (антенн).

# Широкополосный преобразователь, синтез частотных характеристик, короткие акустические сигналы

Вопросам расширения полосы пропускания и связанным с этим задачам получения коротких акустических сигналов посвящено достаточно большое число работ отечественных и зарубежных авторов, отраженных как в оригинальных статьях, так и монографиях [1]–[4], содержащих обширный список источников по указанным направлениям. Интерес к этим вопросам проявляется в области как дефектоскопии, так и гидроакустики. Это связано с требованиями повышения разрешающей способности и информативности сигналов, отраженных от объектов исследо-

.....