

Обработка данных при комплексном подходе к дистанционной регистрации гидродинамических возмущений морской среды

© В.Н. Носов¹, С.О. Леонов², А.М. Горелов²,
С.Б. Каледин², А.С. Савин²

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва 119991, Россия.

² МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва 105005, Россия.

Рассмотрены алгоритмы предварительной обработки сигналов комплекса оптической аппаратуры для их согласования и выделения информативных составляющих. Представлены результаты обработки экспериментальных данных с использованием разработанных алгоритмов. Показано, что предложенные алгоритмы позволяют достичь существенного повышения эффективности применения аппаратуры независимо от текущих метеоусловий.

Ключевые слова: *комплексирование измерений, обработка данных, дистанционное оптическое зондирование, морская поверхность, гидродинамическое возмущение, гидродинамический источник, повышение эффективности.*

Введение. В толще морской среды и на ее поверхности протекают различные гидрофизические процессы. Для их выявления используют специальные методы, среди которых особое место занимают методы дистанционной оптической регистрации эффектов на морской поверхности, в приповерхностном слое морской среды и в приводном слое атмосферы. Используя дистанционные оптические методы, можно регистрировать изменения в спектре поверхностного волнения, обусловленные различными возмущениями морской среды [1]. Кроме того, можно осуществлять регистрацию изменений фонового распределения присутствующих в приповерхностном слое морской среды взвешенных частиц и изменение концентрации приводного аэрозоля при воздействии гидродинамических источников [2–4].

Проведенные в натуральных условиях исследования [1–4] показали, что локализованные в морской среде гидродинамические источники (ГДИ) посредством порождаемых ими гидродинамических возмущений (ГДВ) могут вызывать весьма заметные для оптических средств изменения параметров поверхностного морского волнения, распределения взвешенных частиц в приповерхностном слое морской среды и концентрации аэрозоля в приводном слое атмосферы. Необходимо отметить, что принимаемые сигналы подвержены различному влия-

нию метеорологических и гидрологических условий, что может приводить к снижению эффективности дистанционных средств регистрации. Для уменьшения такого влияния был предложен комплексный подход к дистанционному обнаружению ГДИ по их проявлениям на морской поверхности, в приповерхностном слое морской среды и в приводном слое атмосферы [5, 6].

В силу различия физических эффектов, вызываемых ГДИ в трех средах, и способов регистрации этих физических эффектов погрешности соответствующих измерителей имеют разную зависимость от метеоусловий. Это позволяет синтезировать систему дистанционного оптического зондирования морской среды, включающую в себя сканирующий лазерный локатор, двухканальный фотометр яркости моря и аэрозольный лидар. Созданная система показала устойчивую работу в широком диапазоне метеоусловий. Отметим, что идею комплексирования, т. е. оптимального использования информации об одних и тех же явлениях, полученной посредством различных датчиков, спектры помех которых находятся в различных частотных диапазонах, ранее применяли при решении ряда задач в смежных областях [7, 8].

Алгоритм обработки. Для практической реализации комплексирования необходимо, чтобы все сигналы были однотипными и принадлежали одному пространству признаков. Поскольку в рассматриваемом случае каждый метод регистрации основан на своем физическом принципе, для выделения набора однотипных информационных параметров из сигналов каждого измерителя был разработан специальный алгоритм предварительной обработки, который позволил получить статистические оценки (моменты распределений) для каждого зарегистрированного сигнала.

Общая структурная схема первичной обработки сигналов комплекса оптической аппаратуры представлена на рис. 1.

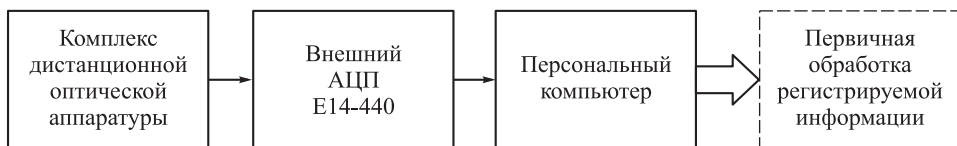


Рис. 1. Общая структурная схема первичной обработки сигналов комплекса оптической аппаратуры

Для каждого канала комплекса дистанционной оптической аппаратуры имеется исходный аналоговый сигнал вида

$$U(t) = SF(R, t),$$

где S — чувствительность приемника излучения; $F(R, t)$ — функция регистрируемой величины.

Приемник оптического излучения осуществляет преобразование физической величины в электрический аналог, последующий анализ которого должен привести к получению однозначного соответствия с измеряемой физической величиной. Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) выполняет дискретизацию по времени и квантование по уровню исходного аналогового сигнала, в результате чего сигнал определен в дискретные моменты времени.

Операции дискретизации и квантования определяются соответственно выражениями

$$X(t_i) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \delta(t - t_i) dt;$$

$$X_0(t_i) = \Delta X \operatorname{ent} \left[\frac{|X(t_i)|}{\Delta X} + k \right] \operatorname{sign} [X(t_i)].$$

Здесь $\delta(t - t_i)$ — дельта-функция Дирака; ΔX — шаг квантования; $\operatorname{ent}[\dots]$ — операция взятия целой части; $k = 0$ при усечении и $0,5$ при округлении; $\operatorname{sign} X$ — знаковая функция,

$$\operatorname{sign} X = \begin{cases} 1, & X > 0; \\ 0, & X = 0; \\ -1, & X < 0. \end{cases}$$

После операции дискретизации и квантования информационный массив представлен в виде дискретного набора амплитуд, которые определены в отдельные моменты времени, и если каждому моменту времени присвоить порядковый номер, то массив амплитуд исходной информации можно записать в виде

$$X_0(t_i) \equiv X_{0,i}, \quad i \in 1, \dots, N.$$

На этапе подготовки сигнала из него должны быть удалены наводки, которые могут появиться вследствие различных помех. Данная процедура не является обязательной и выполняется в зависимости от характера регистрируемого сигнала каждым измерителем. Кроме того, для сигналов сканирующего лазерного локатора устраняют отдельные импульсы малой амплитуды, возникающие вследствие приема прибором паразитных зеркальных бликов от внешних световых источников. Для сигналов двухканального фотометра яркости моря и аэрозольного лидара проводят процедуру синхронного накопления сигнала для повышения отношения сигнал — шум.

Зная частоту дискретизации $f_{\text{дис}}$ АЦП, можно определить число отсчетов N , оцифрованных в буфер за время записи $t_{\text{зап}}$:

$$N = t_{\text{зап}} f_{\text{дис}} = (t_{\text{max}} - t_{\text{min}}) f_{\text{дис}}.$$

После АЦП проводят процедуру нормирования для приведения электрического сигнала к измеряемой величине:

$$X_{1,i} = \frac{X_{0,i} \Delta X}{S_M},$$

где S_M — масштабный коэффициент.

Гармонические наводки и медленные тренды устраняют низкочастотной фильтрацией сигнала, которую можно записать в виде интеграла свертки. В случае дискретного сигнала последний преобразуется в сумму:

$$X_{2,i} = \sum_{h=-w/2}^{w/2} a_i X_{1,(i-h-w/2)}, \quad (1)$$

где a_i — весовые коэффициенты фильтра.

Для реализации низкочастотной фильтрации применяется алгоритм скользящего усреднения с варьируемой шириной окна w , которую выбирают, исходя из необходимой частоты среза фильтра:

$$f_{\text{ср}} = \frac{f_{\text{дис}}}{w}.$$

В общем случае выражение (1) для фильтрации одного элемента сигнала имеет вид

$$X_{2,i} = \sum_{h=0}^w a_i X_{1,(i+h-w/2)}, \quad (2)$$

В случае простой фильтрации $a_i = 1$, поэтому

$$X_{2,i} = \frac{1}{w} \sum_{h=-w/2}^{w/2} X_{1,(h+i)}.$$

Устранение отдельных импульсов для сигналов сканирующего лазерного локатора осуществляют путем пороговой фильтрации. Массив экстремумов определяют, исходя из заданного порога γ_n , выше которого зарегистрированные сигналы от зеркальных бликов можно считать истинными, а не пришедшими от внешних источников.

$$X_{3,i} = X_{2,i} \gamma(X_{2,i}),$$

где

$$\gamma(X_{2,i}) = \begin{cases} 1, & X_{2,i} \geq \gamma_{п}; \\ 0, & X_{2,i} < \gamma_{п}. \end{cases}$$

Значение порога задается оператором по результатам проведения калибровочных измерений.

Для сигналов двухканального фотометра и аэрозольного лидара применяют процедуру синхронного накопления, которая математически описывается суммированием с учетом знаковой функции:

$$X_{3,j} = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^B (-1)^{q_i} X_{2,i+j}, \quad j \in 1, \dots, M,$$

где B — число отсчетов в накоплении, $B = t_{\text{нак}}/t_{\text{дис}}$; q_i — коэффициент, определяемый согласно фазе опорного сигнала,

$$q_i = \begin{cases} 1, & Z_i < Z_{\text{пор}}; \\ 2, & Z_i \geq Z_{\text{пор}}. \end{cases}$$

Из исходного массива информационного сигнала выделяют участки $X_{3,j}^k$ с одинаковой длительностью $t_{\text{набл}}$, которой соответствует число M отсчетов АЦП, вычисляемое по формуле $M = t_{\text{набл}} f_{\text{дис}}$. Индекс j определяет порядковый номер отсчета в пределах одного выделенного участка, $j = (k-1)M, \dots, kM$, а индекс k — порядковый номер выделенного участка в пределах всего записанного объема информации, $k = (1, \dots, Q)$. Число Q выделенных участков сигнала определяют по формуле

$$Q = \frac{N}{M} = \frac{(t_{\text{max}} - t_{\text{min}}) f_{\text{дис}}}{t_{\text{набл}} f_{\text{дис}}} = \frac{(t_{\text{max}} - t_{\text{min}})}{t_{\text{набл}}}.$$

Длительность выделенного участка выбирают в соответствии с масштабом ожидаемого ГДВ, вызываемого ГДИ.

Далее осуществляют построение гистограммы распределения информационных параметров по соответствующим интервалам их изменения для всех сигналов, регистрируемых каждым измерителем. Исследуемый диапазон информационного параметра разбивают на конечное число интервалов, каждому из которых присваивают порядковый номер. Эти интервалы в литературе принято называть каналами гистограммы [9]. За одинаковое для всех каналов время под-

считывают число отсчетов информационного параметра, значение которого лежит в пределах каждого интервала. Каждое дискретное амплитудное распределение информации $X_{3,j}^k$ представляют в виде зависимости частоты попадания C_q значений информационного параметра сигнала в соответствующий интервал разбиения, где q — номер канала (интервала). В результате число наблюдений p_q в q -м интервале группировки равно числу значений сигнала $X_{3,j}^k$, $j = 1, \dots, M$, удовлетворяющих неравенству

$$\left| X_{3,j}^k - x_q \right| < \frac{1}{2} \Delta_q,$$

где $x_q, \Delta_1, \dots, \Delta_q$ — середины и длины интервалов группировки соответственно.

Тогда для всего набора выделенных информационных массивов M можно записать выражение для определения гистограммы распределения информативного параметра каждого сигнала:

$$C_q^k \left(X_{3,j}^k \right) = P \left\{ \left| X_{3,j}^k - x_q \right| < \frac{1}{2} \Delta_q \right\}, \quad (3)$$

где $P\{\dots\}$ — вероятность события, заключенного в фигурные скобки.

В процессе регистрации за каждый промежуток наблюдения $t_{\text{наб}}$ по формуле (3) вычисляется распределение информативного параметра. В результате такой обработки образуется двумерный массив гистограмм $C_q \left(X_3^k \right)$, у которого первой координатой является номер канала гистограммы, второй — временной индекс, соответствующий дискретной временной последовательности оцифрованного сигнала. Значением массива гистограмм является количество информационных параметров, значения которых попадают в интервал, определяемый заданным номером канала гистограммы.

По полученным матрицам гистограмм вычисляют статистические характеристики для отдельных гистограмм и формируют вектор признаков зарегистрированного сигнала. В качестве параметра, характеризующего степень изменчивости каждой гистограммы, использовали медиану распределения

$$\bar{p}_k = \frac{\sum_{i=0}^m X_{3,i}^k C_i^k \left(X_{3,i}^k \right)}{\sum_{i=0}^m C_i^k \left(X_{3,i}^k \right)}, \quad (4)$$

где m – число каналов гистограммы.

В результате набор признаков изменчивости зарегистрированно-го сигнала формируется в виде

$$\Theta_1 = (\bar{p}_k, t). \quad (5)$$

Для каждого измерителя полученные однотипные наборы информативных признаков были подвергнуты процедуре комплексирования с использованием весовых функций:

$$F_{\Theta_\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^N M_i \Theta_i(t), \quad (6)$$

где M_i — весовые функции, учитывающие влияние гидрометеорологических факторов на i -й канал измерения; Θ_i — информационные признаки каждого канала.

Апробация алгоритма. Разработанный алгоритм формирования однотипных векторов признаков для различных сигналов в целях их комплексирования был использован при проведении натуральных экспериментов. В экспериментах регистрировали ГДВ на морской поверхности, в приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы. ГДИ служило надводное судно, отстающий след которого через 40 мин регистрировался одновременно тремя независимыми устройствами. В результате обработки зарегистрированных сигналов была сформирована оценочная функция $F_{\Theta_\Sigma}(2)$ (рис. 2). Видно, что эта функция имеет отчетливо выраженный минимум, ширина которого соответствует области, где присутствуют ГДВ от судна.

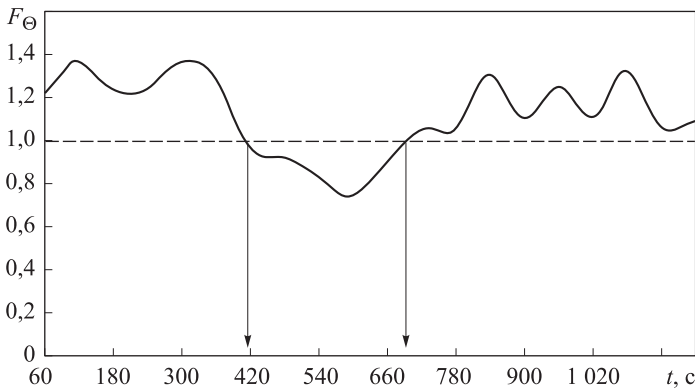


Рис. 2. Характер изменения комплексной оценочной функции

Закключение. Таким образом, описанные порядок подготовки данных и алгоритм обработки сигналов при комплексном подходе к дистанционной регистрации ГДВ позволили существенно повысить эффективность применения аппаратуры независимо от текущих ме-

теоусловий. По сравнению с методом регистрации ГДИ по изменению светорассеяния на аэрозоле в приводном слое атмосферы при использовании комплекса аппаратуры эффективность регистрации ГДИ возрастает примерно на 30 %. Применение предложенного метода комплексирования и совершенствование алгоритмов обработки данных натурных исследований позволит существенно увеличить эффективность обнаружения проявлений ГДИ в морской среде.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 13-08-00538)

ЛИТЕРАТУРА

1. Носов В.Н., Пашин С.Ю. Статистические характеристики ветрового волнения в гравитационно-капиллярной области спектра. *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*, 1990, т. 26, № 11, с. 1161–1169.
2. Иванов С.Г., Носов В.Н., Погонин В.И., Зевакин Е.А., Савин А.С., Горелов А.М., Леонов С.О. Применение фотометра яркости для получения информации о наличии гидродинамических возмущений в морской среде. *Труды Международной научной конференции «Актуальные направления развития прикладной математики в энергетике, энергоэффективности и информационно-коммуникационных технологиях»*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, с. 277–280.
3. Носов В.Н., Горелов А.М., Каледин С.Б., Кузнецов В.А., Леонов С.О., Савин А.С. Рассеяние лазерного излучения над морской поверхностью при наличии гидродинамических возмущений в толще водной среды. *Докл. РАН*, 2010, т. 433, № 1, с. 111–112.
4. Носов В.Н., Каледин С.Б., Горелов А.М., Леонов С.О., Кузнецов В.А., Погонин В.И., Савин А.С. Особенности светорассеяния в приводном слое атмосферы над областями долгоживущих гидродинамических возмущений морской среды. *Докл. РАН*, 2012, т. 442, № 4, с. 549–550.
5. Горелов А.М., Зевакин Е.А., Иванов С.Г., Каледин С.Б., Леонов С.О., Носов В.Н., Савин А.С. О комплексном подходе к дистанционной регистрации гидродинамических возмущений морской среды оптическими методами. *Физические основы приборостроения*. 2012, т. 1, № 4, с. 58–65.
6. Носов В.Н., Горелов А.М., Каледин С.Б., Леонов С.О., Савин А.С., Иванов С.Г. Использование комплексного подхода при оптической дистанционной регистрации структуры гидродинамических возмущений. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Приборостроение*. Специальный выпуск № 9 «Современные проблемы оптотехники», 2012, с. 168–175.
7. Бобнев М.П., Кривицкий Б.Х., Ярлыков М.С. *Комплексные системы радиоавтоматики*. Москва, Сов. Радио, 1968, 232 с.
8. Толкаченко Г.А., Худяков Ю.А. Комплексирование гидрофизических измерительных приборов. *Морские гидрофизические исследования*, Севастополь, МГИ АН УССР, 1975, № 3 (70), с. 220–227.
9. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. *Статистический анализ данных на компьютере*. Фигурнов В.Э., ред. Москва, ИНФРА, 1998, 528 с.

Статья поступила в редакцию 21.02.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

В.Н. Носов, С.О. Леонов, А.М. Горелов, С.Б. Каледин, А.С. Савин. Обработка данных при комплексном подходе к дистанционной регистрации гидродинамических возмущений морской среды. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 2.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden/610.html>

Носов Виктор Николаевич — заведующий отделом морских исследований Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН; автор более 90 научных работ в области гидрофизики и лазерной локации; сфера научных интересов: лазерный контроль морской поверхности, экомониторинг, дистанционное зондирование. e-mail: viktor-nosov@mail.ru

Леонов Станислав Олегович — м. н. с. Научно-образовательного центра «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор 14 научных работ в области оптико-электронных и лазерных приборов; сфера научных интересов: лазерные и оптико-электронные приборы, системы дистанционного контроля, обработка информации. e-mail: leonov-st@ya.ru

Горелов Александр Михайлович — доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана; канд. техн. наук; автор более 60 научных работ в области алгоритмов для оптико-электронной обработки информации; сфера научных интересов: лазерные и оптико-электронные приборы, системы дистанционного контроля, обработка информации. e-mail: amgorelov@mail.ru

Каледин Сергей Борисович — доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 40 научных работ в области оптико-электронных приборов; сфера научных интересов: лазерные и оптико-электронные приборы, системы дистанционного контроля, обработка информации. e-mail: sbkaleden@mail.ru

Савин Александр Сергеевич — профессор кафедры «Высшая математика МГТУ им. Н.Э. Баумана; д-р физ.-мат. наук; сфера научных интересов: теоретическая и прикладная гидродинамика; автор около 100 научных работ. e-mail: losavina@rambler.ru