

В. Н. Носов, А. М. Горелов, С. Б. Каледин,  
С. О. Леонов, А. С. Савин, С. Г. Иванов

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ СТРУКТУРЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ВОЗМУЩЕНИЙ

*Представлен вариант комплексирования различных дистанционных оптических методов регистрации проявлений гидродинамических источников. Разработаны метод и алгоритм обработки сигналов используемых оптических локаторов. Приведены результаты натурного эксперимента по регистрации характерного гидродинамического возмущения (собственного отстающего поверхностного следа судна).*

**E-mail:** viktor\_nosov@mail.ru, sbkaledin@mail.ru

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

В настоящее время большую актуальность приобретает задача регистрации процессов и явлений, происходящих в океанической и морской среде, и в частности дистанционная регистрация слабых гидродинамических возмущений по их косвенным проявлениям различными методами. Среди этих методов весьма перспективными являются методы дистанционной оптической регистрации. Они позволяют регистрировать гидродинамические источники (ГДИ) в толще моря по их проявлениям на морской поверхности, в приповерхностном слое моря и в приводном слое атмосферы [1—4].

Оптические методы обладают рядом преимуществ по сравнению с другими методами, среди которых можно выделить высокую чувствительность и разрешающую способность. Однако главным их недостатком является зависимость (в отличие от средств радиодиапазона) возможностей их использования от существующих в момент измерения метеоусловий. Следует отметить, что известные оптические методы дистанционного зондирования, позволяющие регистрировать проявления гидродинамических возмущений на морской поверхности в условиях штиля или сильного шторма неприменимы, поскольку условия появления зеркальных бликов на морской поверхности не выполняются. В то же время методы оптической регистрации проявлений ГДИ в приповерхностном слое морской среды и приводном

слое атмосферы в условиях штиля максимально эффективны, т. е. информация, регистрируемая различными методами, подвержена влиянию метеорологических и гидрологических условий в зависимости от фоновой изменчивости параметров перечисленных выше сред. Поэтому для повышения эффективности дистанционной регистрации ГДИ в любых метеоусловиях необходим комплексный подход как к использованию различных дистанционных оптических методов регистрации, так и к обработке получаемой с их помощью информации [5].

В данной работе рассмотрен оптимизированный алгоритм комплексирования информации о ГДИ, полученной по разным каналам измерения. Задача комплексирования заключается в обеспечении связи используемых измерителей, методов и всех информационных потоков в единую информационную систему. Задача комплексирования также тесно связана с задачей систематизации, широко применяемой в науке и технике, в областях, где необходимо проводить измерения с высокой степенью точности и достоверности. Смысл комплексирования [6, 7] состоит в оптимальном использовании информации об одних и тех же физических величинах или явлениях, полученных с различных датчиков.

В разрабатываемых оптических дистанционных системах для гидрофизических исследований комплексирование наиболее эффективно использовать для косвенного исследования гидрофизических процессов. Благодаря различным физическим принципам, положенным в основу измерителей, ошибки измерений которых имеют разную зависимость от конкретных метеоусловий, существует возможность синтезировать систему, которая будет работать в различных метеоусловиях без снижения эффективности регистрации явления.

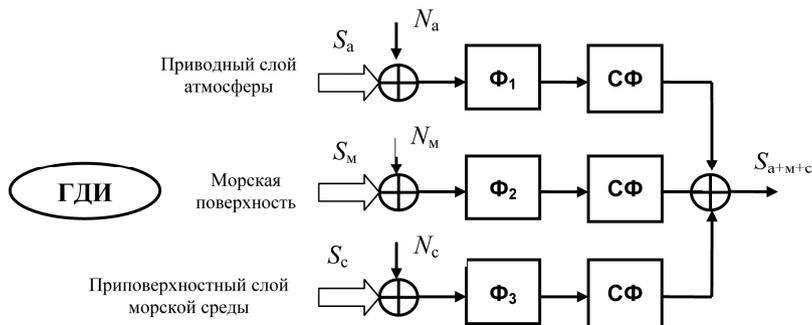
Обобщенная схема комплексирования различных методов измерений на основе метода фильтрации [6] представлена на рис. 1.

Повышение эффективности дистанционной оптической регистрации проявлений ГДИ в различных метеоусловиях достигается путем оптимальной совместной обработки данных от всех используемых измерителей с целью ее дальнейшего комплексирования. В предлагаемом алгоритме обработка сводится к выделению из каждого информационного сигнала множества признаков изменчивости и расчету их статистических характеристик. Такая обработка позволяет унифицировать различные по своей природе информационные сигналы и делает возможной их совместную обработку.

Представим исходный информационный цифровой сигнал в виде

$$U_i(t_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(t) \delta(t - t_i) dt,$$

где  $i$  — номер отсчета;  $U(t)$  — исходный аналоговый сигнал.



**Рис. 1. Схема комплексирования трех различных методов измерения:**

$S_a, S_m, S_c$  — воздействия ГДИ на приводный слой атмосферы, морскую поверхность и приповерхностный слой морской среды соответственно;  $N_a, N_m, N_c$  — помеховые воздействия на приводный слой атмосферы, морскую поверхность и приповерхностный слой морской среды соответственно;  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  — фильтры для устранения воздействия помех; СФ — согласующие фильтры для оптимальной обработки информации в каждом канале

На первом этапе из исходного цифрового сигнала выделяется необходимая информационная составляющая

$$A_i(t_i) = L\{U_i(t_i)\},$$

где  $L\{\dots\}$  — оператор, реализующий алгоритм выделения информационной составляющей из исходного сигнала (например, определение максимального значения и положения максимального значения импульса исходного сигнала). Далее проводится расчет гистограммы распределения значений информационной составляющей исходного сигнала за определенное время  $t$  измерения:

$$C_A^k(q_j) = H\left\{\left|A_{i(k)} - q_j\right| < \frac{1}{2}\Delta_q\right\},$$

где  $k$  — индекс текущего номера отдельной гистограммы, полученной для выбранной части последовательности исходного цифрового сигнала;  $q_j$  — центр  $j$ -го канала гистограммы;  $H\{\}$  — оператор формирования гистограммы;  $\Delta_q$  — ширина каналов гистограммы.

На следующем этапе для каждой отдельной гистограммы вычисляются необходимые статистические параметры, например: медиана распределения

$$q_k = \frac{\sum_{i=0}^m q_i C_A^k(q_i)}{\sum_{i=0}^m C_A^k(q_i)} \quad (1)$$

и дисперсия по медиане

$$s_k^2 = \frac{\sum_{i=0}^m (q_i - \bar{q}_k)^2 C_A^k(q_i)}{\sum_{i=0}^m C_A^k(q_i)}, \quad (2)$$

где  $m$  — число каналов гистограммы.

В результате расчета формируется вектор признаков зарегистрированного сигнала в виде

$$\bar{\Theta} = (p_1, p_2, \dots), \quad (3)$$

где  $p_i$  — рассчитанные по гистограммам значения признаков (например, (1) и (2)). Такой вектор вычисляется для каждого канала измерений.

До проведения комплексирования необходимо все информационные признаки нормировать, поэтому для каждого полученного вектора признаков (3) осуществляется процедура нормировки:

$$\Theta_j^i = \frac{\Theta_j^i - \Theta^{\min}}{\Theta^{\max} - \Theta^{\min}},$$

где  $i$  — индекс канала;  $j$  — индекс текущего признака в векторе. В результате такой нормировки каждый элемент вектора признаков нормирован по диапазону значений  $[0, 1]$ .

Формирование оценочной функции осуществляется следующим образом:

$$f_{\Theta_\Sigma}(t) = \sum_i^N M_i \Theta_i(t),$$

где  $i$  — число каналов,  $i = 1, \dots, N$ ;  $M_i$  — коэффициенты, учитывающие влияние гидрометеорологических факторов;  $\Theta_i$  — информационные признаки каждого канала.

На основе полученной оценки определяются области, где присутствуют ГДИ:

$$\left| f_{\Theta_\Sigma}(t)^{\text{ГДИ}} - f_{\Theta_\Sigma}(t)^{\text{фон}} \right| \geq \delta_{\text{отк}},$$

где  $f_{\Theta_\Sigma}(t)^{\text{фон}}$  — оценочная функция исходного (фонового) состояния среды;  $\delta_{\text{отк}}$  — заданное отклонение оценочной функции.

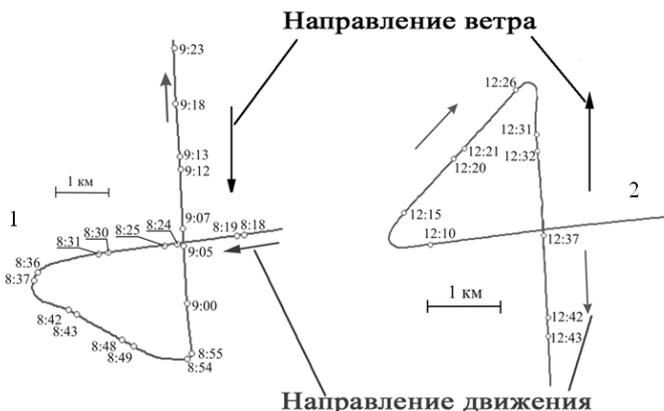
На основе данного подхода разработана комплексная система регистрации проявлений ГДИ на морской поверхности, в приповерхностных слоях атмосферы и морской среды. На рис. 2 представлен комплекс измерительной аппаратуры. Для регистрации изменения характеристик поверхностного волнения использовался сканирующий лазерный локатор 1. Изменения концентрации приповерхностного фитопланктона и аэрозоля регистрировались соответственно с помощью двухканального фотометра 2 и аэрозольного лидара 3.



**Рис. 2. Комплекс измерительной аппаратуры:**

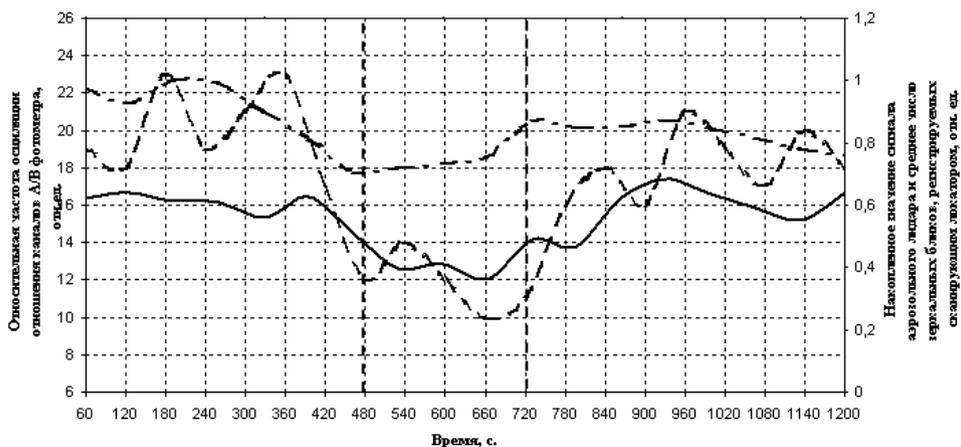
*а* — размещение сканирующего локатора (1); *б* — размещение фотометра (2) и аэрозольного лидара (3)

На рис. 3 приведена схема маневрирования судна в процессе выполнения экспериментов. Курс судна рассчитывался таким образом, чтобы в процессе движения оно пересекало собственный отстающий след. Возраст следа в момент пересечения составлял около 40 мин.



**Рис. 3. Схемы (1, 2) маневрирования судна в процессе выполнения экспериментов**

Полученные данные от каждого канала, входящего в комплекс регистрирующей аппаратуры, для двух пересечений отстающего следа надводного судна были обработаны по разработанным алгоритмам. Рассчитанные наборы информативных признаков для сигналов каждого канала комплексной системы приведены на рис. 4.

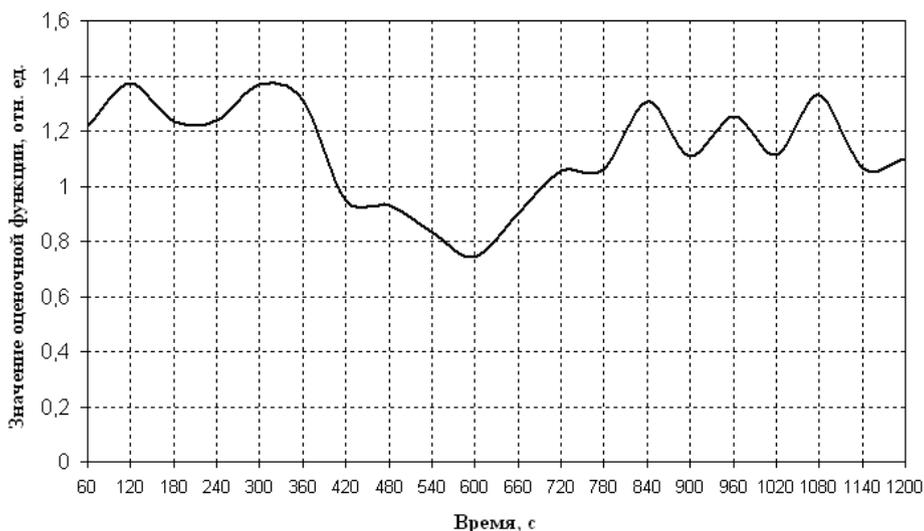


**Рис. 4. Временные зависимости информативных признаков при первом пересечении отстающего следа**

Сплошной линией представлена временная зависимость параметра сигнала лазерного сканирующего локатора, определяемого средним значением числа зеркальных бликов на морской поверхности. Штриховой линией обозначена временная зависимость параметра сигнала двухканального фотометра в виде среднего периода осцилляций отношения каналов А/В, определяемого частотой изменений приповерхностной концентрации фитопланктона относительно среднего значения его концентрации. Штрихпунктирной линией отмечена временная изменчивость параметра сигнала аэрозольного лидара, определяемого изменением концентрации приводного аэрозоля. Данные реализации сигналов приведены за время 20 мин, что с учетом скорости движения судна составляет 4,8 км пройденного расстояния. Видно, что для текущих условий сигнал для аэрозольного лидара является слабоинформативным, так как его изменения находятся в пределах дисперсии, что накладывает на этот метод ограничения при работе в данных метеоусловиях.

Далее проводилось комплексирование трех отдельных информационных признаков с учетом весовых функций — коэффициентов комплексирования для сигналов сканирующего локатора  $M_1 = 0,5$ , аэрозольного лидара  $M_2 = 0,2$  и двухканального фотометра  $M_3 = 0,7$ .

В результате комплексирования получена единая оценочная функция (рис. 5).



**Рис. 5. Комплексная оценочная функция для первого пересечения отстающего следа**

Если в качестве порогового значения (порога) выбрать значение на уровне дисперсии полученной комплексной оценки, то, как видно на рис. 5, полученная оценочная функция имеет ярко выраженное превышение порога.

Как показали полученные результаты, при использовании комплексного подхода к регистрации ГДИ для текущих метеоусловий достигается существенное повышение эффективности регистрации поверхностного следа судна. Так, по сравнению с методом регистрации проявлений таких ГДИ в приводном слое атмосферы применение комплекса измерительной аппаратуры позволило повысить эффективность регистрации на 20...30 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассеяние лазерного излучения над морской поверхностью при наличии гидродинамических возмущений в толще водной среды / В.Н. Носов, А.М. Горелов, С.Б. Каледин и др. // Доклады Академии наук. Академиздатцентр «Наука» РАН. 2010. Т. 433. № 1. С. 111–112.
2. Особенности светорассеяния в приводном слое атмосферы над областями долгоживущих гидродинамических возмущений морской среды / В.Н. Носов, С.Б. Каледин, А.М. Горелов и др. // Доклады Академии наук. Академиздатцентр «Наука» РАН. 2012. Т. 442. № 4. С. 549–550.
3. Использование двухканального фотометра для регистрации гидродинамических явлений / С.Г. Иванов, В.Н. Носов, В.И. Погонин и др. // Материалы 4-й Международной научно-технической конференции Российской НТОРЭС им. А.С. Попова «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». Суздаль: Изд-во ООО «Информпресс-94», 2011. С. 96–98.

4. Носов В. Н., Пашин С. Ю., Симановский Я. О. Оптическая регистрация гидродинамических возмущений поверхностного волнения // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. 1983. Вып. 17. С. 32–38.
5. К вопросу о комплексном подходе к дистанционной регистрации гидродинамических возмущений морской среды оптическими методами / А.М. Горелов, Е.А. Зевакин, С.Г. Иванов и др. // Тр. XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2012. С. 277–280.
6. Бобнев М. П., Кривицкий Б. Х., Ярлыков М. С. Комплексные системы радиоавтоматики. М.: «Сов. радио», 1968. 232 с.
7. Толкаченко Г. А., Худяков Ю. А. Комплексование гидрофизических измерительных приборов // Морские гидрофизические исследования. № 3 (70). Севастополь: МГИ АН УССР, 1975.

Статья поступила в редакцию 28.09.2012.