

В. Н. Н о с о в, А. М. Г о р е л о в,  
С. Б. К а л е д и н, А. С. С а в и н,  
С. О. Л е о н о в

## КОРРЕЛЯЦИОННО-МАТРИЧНЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*Рассмотрен новый способ обработки данных со сканирующего лазерного локатора для регистрации параметров морского волнения. Приведены результаты обработки данных, полученных при проведении натурных испытаний по регистрации собственного отступающего поверхностного следа судна.*

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

**Ключевые слова:** морское волнение, обработка данных, дистанционное зондирование, зеркальный блик, корреляционная матрица.

Дистанционное зондирование взволнованной морской поверхности применяется при решении различных геофизических задач. При измерении характеристик поверхностного волнения могут быть использованы средства наблюдения, работающие в оптическом диапазоне. Рассеяние оптического излучения от морской поверхности носит нерезонансный характер, в силу чего использование оптических методов позволяет достигать одинаковой чувствительности для всех длин волн поверхностного волнения. В настоящей работе предложен способ и приведены результаты обработки данных, полученных при натурных исследованиях в акватории Черного моря методом активного сканирования морской поверхности узким лазерным лучом [1, 2]. Локатор, реализующий данный метод, располагался на борту исследовательского судна на носовом выстреле (выдвижная балка, расположенная на носу судна). В процессе выполнения экспериментов регистрировался собственный отступающий поверхностный след судна.

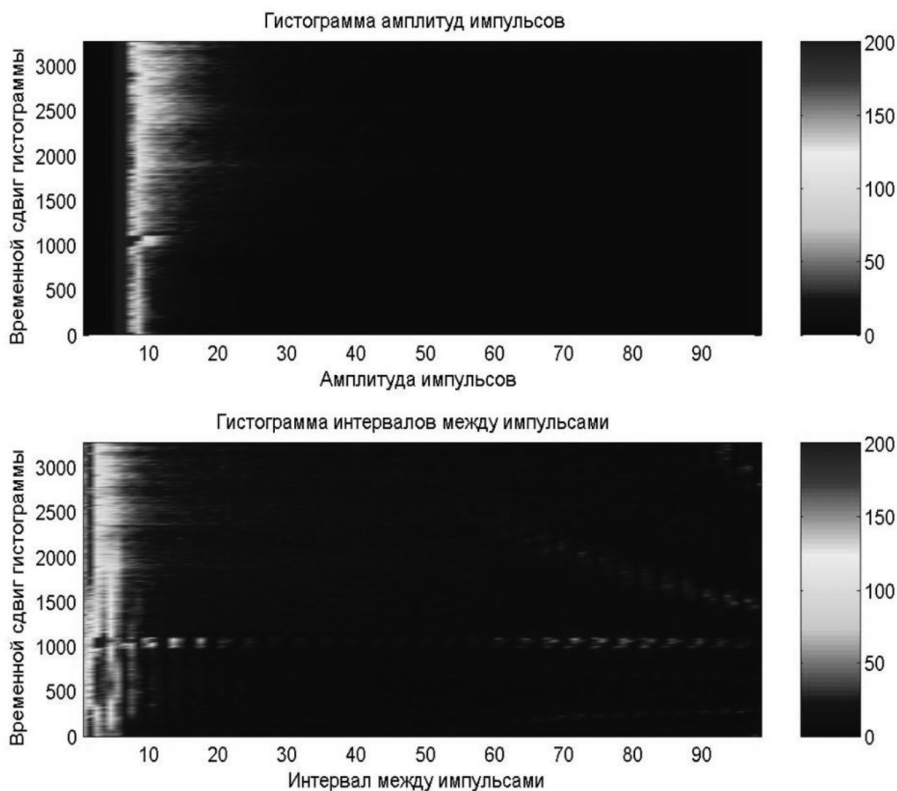
Сканирующий лазерный локатор (СЛЛ) формирует узкий луч, двигающийся по морской поверхности. При совпадении направления зондирующего лазерного пучка и нормали к морской поверхности приемной оптической системой локатора регистрируется зеркальный блик. Отраженный бликовый поток излучения, а значит, и амплитуда сигнала приемного канала зависят от радиуса кривизны водной поверхности в точке отражения. Из-за большой линейной скорости сканирования по поверхности воды фотосигналы имеют форму коротких электрических импульсов, временное положение которых определяется пространственным распределением зеркальных точек на водной поверхности. Направление, под которым регистрируется зеркальный блик, определяется уклоном морской поверхности в данной точке. Таким

образом, лазерный локатор позволяет регистрировать кривизну морской поверхности в окрестности зеркального блика, пространственные масштабы поверхностных волн и их уклоны.

Рассматриваемый метод показал высокую эффективность при выявлении областей морской поверхности с измененными по отношению к фоновым характеристикам параметрами морского волнения. Известно, что возмущения, возникающие в морской среде и приводных областях атмосферы, проявляющиеся в виде индуцируемых на поверхности моря течений, вызывают трансформацию капиллярной и капиллярно-гравитационной частей спектра поверхностного волнения [3, 4]. В качестве примеров источников таких возмущений можно привести обтекаемые морским течением неровности дна, выходящие на поверхность внутренние волны, ветровое воздействие. Мелкомасштабные поверхностные волны весьма чувствительны к указанным факторам и являются хорошим индикатором их присутствия. Вместе с тем капиллярные волны во многом определяют отражательные свойства морской поверхности в оптическом диапазоне электромагнитного излучения. В видимой области спектра длина волны зондирующего сигнала много меньше радиусов кривизны отражающих элементов возмущенной морской поверхности, среднее значение которых лежит в пределах 14...25 см. Поэтому здесь соблюдается критерий пригодности приближения геометрической оптики для каждого элемента зондируемой морской поверхности, что определяет некоторые особенности обработки сигналов в рассматриваемом методе.

Наиболее известные методы обработки сигналов СЛЛ делятся на спектральные и статистические. Спектральная обработка коротких импульсов не является оптимальной, поэтому в настоящей работе применяется статистический подход, основанный на получении распределений некоторых параметров выходного сигнала локатора. Перед основной обработкой сигнала в целях устранения приборных ошибок из оцифрованного сигнала удаляется низкочастотная трендовая часть и подавляется гармоническая сетевая наводка. Тренд из исходного сигнала СЛЛ удаляется низкочастотной фильтрацией с последующим вычитанием результата из исходного сигнала. Подавление гармонической наводки реализуется узкополосной фильтрацией исходного сигнала на частоте наводки и также вычитанием результата из исходного сигнала.

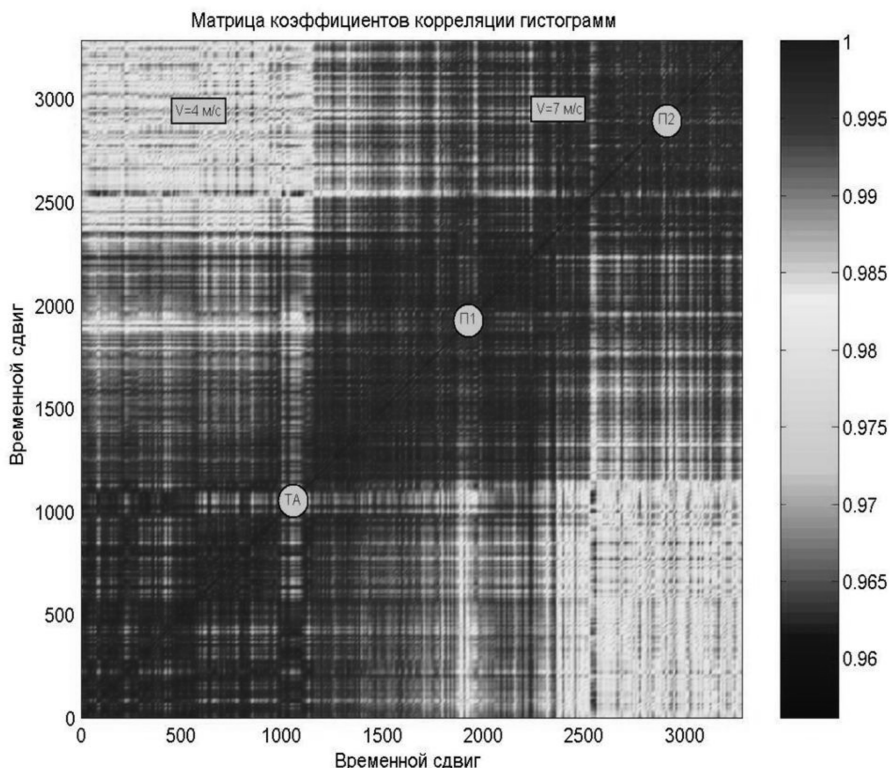
На первом этапе статистической обработки формируются массивы распределений (гистограмм) максимумов амплитуд сигнала СЛЛ и их временных положений. Для ускорения процесса применяются специальные матричные алгоритмы обработки. На рис. 1 приведен пример визуализации полученных в одном из экспериментов массивов гистограмм распределений амплитуд импульсов исходного сигнала и временных интервалов между импульсами.



**Рис. 1. Пример визуализации массивов гистограмм распределений**

Графики визуализируют массивы гистограмм последовательных выборок исходного сигнала. Длительность реализации исходного сигнала для получения одной гистограммы составляет 10 с. По оси абсцисс отложены значения случайного параметра, для которого строится распределение. По оси ординат — момент времени начала записи отдельной гистограммы-строки относительно начала записи всего массива гистограмм в секундах — временной сдвиг гистограммы. Аппликата гистограммы (число импульсов в выборке) в зависимости от практического назначения гистограммы кодируется либо условным цветом, либо изолиниями, либо высотой изометрической проекции или любыми комбинациями этих параметров (в нашем случае — условные градации серого цвета, шкала градаций дана в правой стороне рис. 1).

На следующем этапе обработки формируются матрицы коэффициентов корреляции. На рис. 2 показан пример матрицы коэффициентов корреляции массива гистограмм — комбинированной статистической характеристики, весьма чувствительной к изменению параметров зондируемой морской поверхности. По осям графика отложены временные сдвиги каждой гистограммы (начальные моменты времени исходного сигнала, используемого для формирования данной гистограммы



**Рис. 2. Матрица коэффициентов корреляции массива гистограмм**

в массиве) относительно момента начала наблюдения, которые можно трактовать как номера соответствующих гистограмм. Каждая точка графика является коэффициентом корреляции гистограмм массива с соответствующими временными сдвигами, отложенными по осям абсцисс и ординат графика матрицы коэффициентов корреляции. Значение коэффициента корреляции кодируется соответствующим цветом (или интенсивностью для черно-белого изображения). По главной диагонали матрицы проходит линия единичных коэффициентов корреляции. В силу симметрии коэффициентов корреляции относительно своих индексов матрица симметрична относительно главной диагонали.

В приведенной на рис. 2 матрице четко различаются крупномасштабные участки (1...3 км) с различным средним коэффициентом корреляции (например, области в левом верхнем и в правом нижнем углах, отличающиеся по интенсивности от основной площади матрицы). Эти аномалии можно интерпретировать как изменение характера волнения в данный момент времени в связи с наблюдаемыми изменениями метеоусловий (направление и сила ветра, наличие атмосферных осадков и т.п.). На эту картину наложены локальные аномалии в виде узких вертикальных и горизонтальных полос.

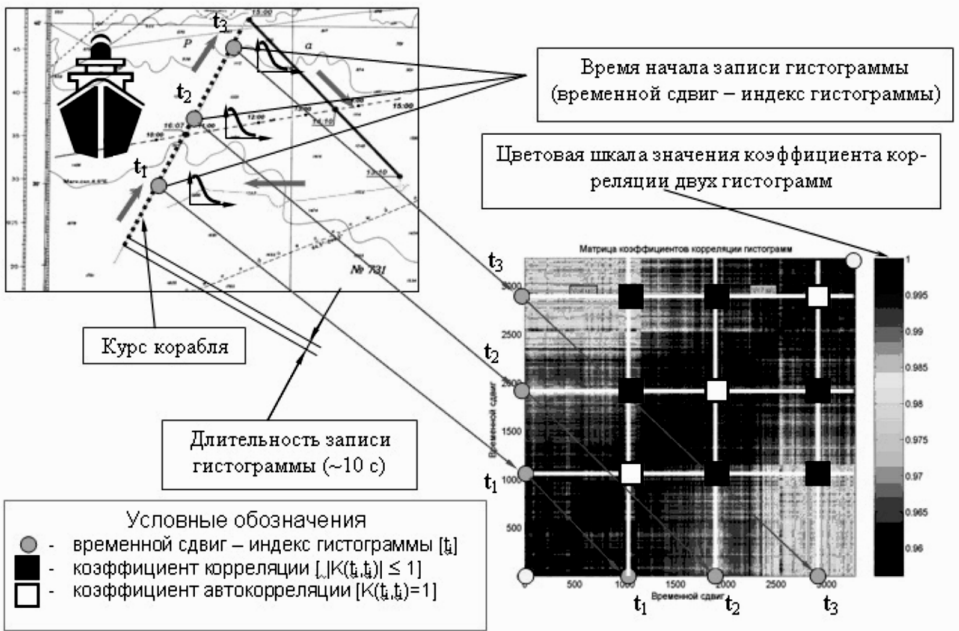


Рис. 3. Формирование матрицы коэффициентов корреляции

На рис. 3 показан механизм формирования матрицы корреляции при проведении экспериментальных измерений на борту судна при пересечении его собственного отстающего поверхностного следа.

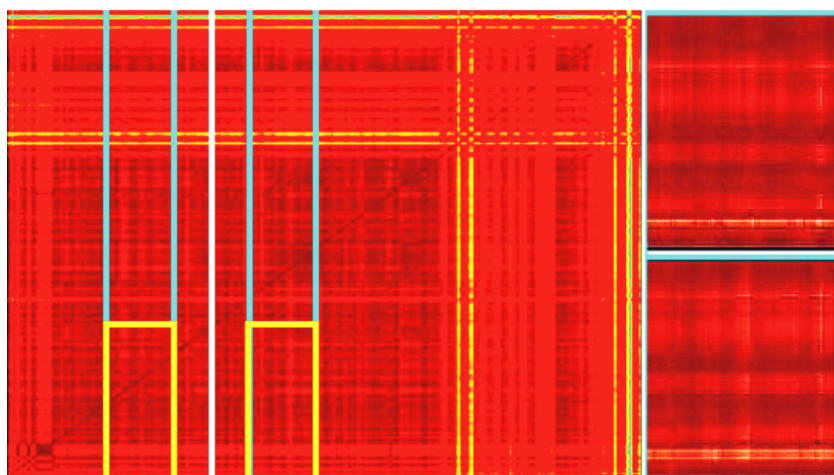
В левой верхней части рис. 3 показан пример прокладки курса судна в ходе эксперимента. Стрелками указано направление движения судна, точками отмечено время начала записи элементарных гистограмм. Длительность записи одной гистограммы равнялась 10 с. За это время с учетом средней скорости судна (6 узлов) и поперечного размера зоны сканирования (5 м) регистрировались блики на площади  $150 \text{ м}^2$ . Таким образом, регистрировались аномалии с пространственными масштабами более 30 м. На схеме прокладки курса кружками выделены моменты времени начала записи ( $t_1, t_2, t_3$ ) трех произвольно выбранных элементарных гистограмм. Справа от выбранных участков записи приведены характерные гистограммы. В правом нижнем углу рисунка показано графическое отображение матрицы корреляционных коэффициентов, полученной на основе записанных во время движения судна гистограмм. На осях графика, также кружками, выделены те же моменты времени  $t_1, t_2, t_3$ . На поле графика матрицы отмечены точки, соответствующие коэффициентам взаимной корреляции элементарных гистограмм для этих моментов времени (обозначены черными квадратами), и точки, соответствующие их автокорреляции (обозначены белыми квадратами). Белыми линиями на рис. 3 отмечены выбранные моменты времени.

Как известно, с учетом симметрии коэффициентов корреляции, матрица этих коэффициентов является симметричной относительно главной диагонали, поэтому для выбранных моментов времени, выделенных на рис. 3, по матрице определяются три коэффициента взаимной корреляции  $K(t_1, t_2)$ ,  $K(t_1, t_3)$ ,  $K(t_2, t_3)$  — под главной диагональю, три аналогичных коэффициента  $K(t_2, t_1) = K(t_1, t_2)$ ,  $K(t_3, t_1) = K(t_1, t_3)$ ,  $K(t_3, t_2) = K(t_2, t_3)$  — над главной диагональю и три единичных коэффициента автокорреляции  $K(t_1, t_1)$ ,  $K(t_2, t_2)$ ,  $K(t_3, t_3)$  — на главной диагонали матрицы.

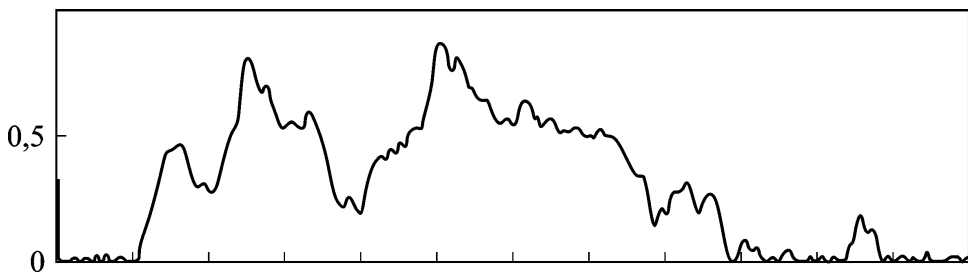
Исследовательское судно, на котором размещался СЛЛ, пересекало свой кильватерный след в различные моменты времени. В условиях проводимого натурального эксперимента этот след формировался при длительном прямолинейном и равномерном движении судна на глубокой воде и поэтому представлял собой область возмущенной морской поверхности, практически симметричную относительно оси движения судна.

На рис. 4 показан участок матрицы коэффициентов корреляции для отстающего следа судна с возрастом  $\sim 1$  ч. На рисунке белой линией обозначено предполагаемое положение турбулентного следа, основным источником которого являются возмущения от вращающегося винта прошедшего судна. Слева и справа от него выделены участки ожидаемых поверхностных аномалий от корабельных волн, образующихся при обтекании корпуса судна. На правой стороне рис. 4 эти участки показаны отдельно в увеличенном масштабе и развернуты на  $90^\circ$  и  $270^\circ$ .

На рис. 4 ясно просматривается симметричность выделенных участков и относительно турбулентного следа. Структура полос, которая видна на выделенных участках, обусловлена поверхностными



**Рис. 4.** Участок матрицы коэффициентов корреляции с симметричной структурой



**Рис. 5. Результат корреляционной обработки**

аномалиями от воздействия цуга корабельных волн. Более четко эта структура видна на правой стороне рисунка. Здесь заметна тонкая структура аномалий следа от корабельных волн в виде системы полос разной толщины и интенсивности. При сравнении структур правой и левой областей хорошо видна пространственная симметрия этих структур относительно положения турбулентного следа.

На следующем этапе проводится корреляционная обработка полученной матрицы в целях выявления симметрии выделенных структур. Выполняемая математическая операция — свертка левой стороны структуры следа с правой, при наличии симметрии дает максимальный отклик в месте ожидаемого расположения аномалий от правой стороны цуга корабельных волн. Результат такой обработки представлен на рис. 5, где видны два корреляционных максимума, первый — от автосвертки левой стороны структуры следа, второй — от свертки левой стороны с правой.

Следует отметить, что по полученным таким образом данным, зарегистрированным при нескольких пересечениях отстающего следа (различного возраста) судна, можно получить достаточно точную информацию о его скорости, направлении движения и местоположении.

Данный метод при работе с аппаратурой, расположенной на судовой платформе, позволяет фиксировать изменения характеристик взволнованной морской поверхности в относительно небольших областях. При размещении аппаратуры на аэроплатформе область наблюдаемой морской поверхности может быть существенно расширена, что позволит значительно увеличить производительность рассмотренного метода при наблюдении возмущений существенно большего масштаба.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В у Ж., Х а й м б а х С. П., Х с у Ю. Л. Сканирующий прибор для исследования ветровой ряби на поверхности моря // Приборы для научных исследований. — 1981. — № 8. — С. 120–126.

2. О б и с п о л ь з о в а н и и зеркально-бликовых отражений для дистанционной регистрации параметров морского волнения / В.Н.Носов, С.Ю.Пашин, А.М.Горелов и др. // Материалы Третьей Всеросс. конф. “Взаимодействие подводных возмущений с поверхностными волнами (гидродинамическая основа радиотомографии)”. ИПМ РАН, М., 2004 г. – С. 10–12.
3. Ф е д о р о в К. Н., Г и н з б у р г А. И. Приповерхностный слой океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1988.
4. М о н и н А. С., К р а с и ц к и й В. П. Явления на поверхности океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1985.

Статья поступила в редакцию 22.11.2010

Александр Михайлович Горелов родился в 1955 г., окончил в 1978 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 60 научных работ в области алгоритмов оптико-электронной обработки информации.

A.M. Gorelov (b. 1955) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1978. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Laser and Optic-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications in the field of algorithms for optic-electronic processing of data.

Сергей Борисович Каледин родился в 1956 г., окончил в 1979 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 50 научных работ в области оптико-электронных приборов.

S.B. Kaledin (b. 1956) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1979. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Laser and Optic-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of optic-electronic devices.

Виктор Николаевич Носов родился в 1947 г., окончил в 1971 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Института геохимии и аналитической химии РАН. Автор более 80 научных работ в области гидрофизики и лазерной локации.

V.N. Nosov (b. 1947) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. D. Sc. (Eng.), leading researcher of the Institute for Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences. Author of more than 80 publications in the field of hydrophysics and laser location.

Станислав Олегович Леонов родился в 1986 г., окончил в 2009 г. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Младший научный сотрудник и аспирант Института геохимии и аналитической химии РАН. Автор 4 научных работ в области оптико-электронных и лазерных приборов.

S.O. Leonov (b. 1986) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2009. Junior researcher and post-graduate student of the Institute for Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences. Author of 4 publications in the field of optic-electronic and laser devices.

Александр Сергеевич Савин родился в 1958 г. Д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры “Высшая математика” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 80 научных работ в области теоретической и прикладной гидродинамики.

A.S. Savin (b.1958) — D. Sc. (Phys.-Math.), professor of “Higher Mathematics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 80 publications in the field of theoretical and applied hydrodynamics.