

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.46

Б.Д. Борисов, В.А. Крутиков

О ДИСТАНЦИОННОМ ОБНАРУЖЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ АНОМАЛИЙ ВЗВОЛНОВАННОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Обсуждаются результаты предварительных экспериментов, связанных с дистанционной диагностикой состояния взволнованной морской поверхности с летательного аппарата в темное время суток на основе покадровой статистической обработки ее телевизионных изображений, полученных при подсветке поверхности направленным оптическим импульсом.

Рассматриваются и сравниваются по информативным признакам оценки пространственных амплитудной, частотной и автокорреляционной функций структуры изображений при фоновом ветровом волнении и в области кильватерного следа движущегося судна.

Разработке методов и средств дистанционного зондирования морской поверхности с целью изучения пространственно-временных параметров волнения на достаточно большой площади и для различных практических целей уделяется значительное внимание [1–5]. При этом во многих случаях необходимо обеспечить оперативную регистрацию и анализ характеристик пространственного распределения мелкомасштабного волнения и особенно нахождение участков аномалий структуры взволнованной морской поверхности (МП) на фоне свободного ветрового волнения. Такие явления могут возникать, например, при взаимодействии внутренних волн с волнением на поверхности, когда наиболее существенны изменения в спектре коротких поверхностных волн. Изменение режима поверхностного волнения происходит также под действием нефтяных пленок и пленок ПАВ.

Необходимость в получении оперативной информации о состоянии границы раздела атмосфера – океан определяется и другими научными и прикладными проблемами, такими как исследование динамики поверхностного волнения, течений и циркуляционных движений на поверхности океана, обнаружения кильватерных следов движущихся судов и т.п. Кроме того, при практическом использовании методов дистанционного зондирования часто возникает необходимость обеспечения наблюдения ночью, а также через туманные и дымовые образования.

В условиях дневного освещения для решения подобных задач успешно используются методы анализа пространственных спектров оптического изображения МП, приведенные в работе [5]. В случае большого числа бликов при солнечном освещении передаточная характеристика, преобразующая поля высот и уклонов поверхности в поля яркости изображений, существенно нелинейна, поэтому необходима разработка специальных методов решения этой проблемы [6]. Аналогичная ситуация возникает и при решении данной задачи для темного времени суток, когда используется импульсная оптическая подсветка [7].

Как видим, проблема дистанционного зондирования МП весьма актуальна и охватывает широкий круг вопросов. Если сузить границы исследуемой проблемы рамками поиски методики оперативного обнаружения области аномального поверхностного волнения аппаратными средствами, то постановка задачи может быть упрощена. Рассмотрим возможность обнаружения сглаженной поверхности или слик на МП на примере турбулентного следа судна ночью в открытом океане.

Поле яркости морской поверхности при импульсном освещении ее источником с малыми (размер излучателя значительно меньше расстояния до исследуемой плоскости) угловыми размерами в ночных условиях по своей структуре существенно отличается от поля яркости при естественном дневном освещении (т.е. протяженным источником). Это прежде всего определяется различными условиями освещения, поскольку при направленной подсветке основ-

ной вклад в регистрируемое изображение дают блики, возникающие в точках морской поверхности (фацетах), где выполняется условие зеркального отражения.

В реальных системах наблюдения регистрируемое поле яркости, кроме состояния МП, определяется диаграммой направленности источника и полем зрения приемной системы (углами падения и отражения излучения подсветки к исследуемой поверхности). При импульсной подсветке в надир положение бликовой составляющей сигнала в плоскости изображения формируется в пределах телесного угла с вершиной в точке МП, из которой наблюдается источник подсветки.

Существует однозначно определенное геометрическими параметрами системы наблюдения взаимное соответствие между декартовыми координатами точек на МП и уклонами элементов поверхности (отклонения нормали элементарной площадки от вертикальной оси), дающими блики в этой точке. При этом практически отсутствуют требования угловой равномерности диаграммы направленности и ограничения на временную форму импульса источника подсветки, поскольку регистрируется пространственное расположение блика над уровнем рассеянного фона. Эта особенность изображений, получаемых при освещении МП импульсным источником малых угловых размеров, дает возможность использовать их для получения оценок плотности распределения уклонов взволнованной МП.

Прямые экспериментальные измерения [8] показали, что в области свободных ветровых волнений (область фоновых волнений) функция распределения уклонов площадок близка к двумерному нормальному распределению (с некоторой поправкой к квадратичному показателю степени). Однако в литературе отсутствуют данные о длинах, времени жизни и характере турбулентных следов от судов при различных погодных условиях [3], не говоря об их изображениях, полученных с летательных аппаратов. Поэтому необходимо было провести предварительные натурные исследования структуры взволнованной МП, в том числе для оценки принципиальной возможности нахождения ее пространственных аномалий в ночных условиях и выявления приемлемых характеристик и отличительных признаков, которые могли бы позволить находить подобные аномалии в автоматическом режиме. С этой целью был проведен лётный эксперимент в условиях открытого моря. При этом для получения определенной совокупности изображений МП как в области фонового волнения, так и вне ее рабочий курс самолета проходил либо в одной плоскости с направлением движения судна, либо пересекал след. Было сделано восемь таких галсов, протяженностью около 10 км, обеспечивающих получение определенной последовательности пространственных изображений. Высота полетов при выполнении рабочих галсов составляла 300 м при средней скорости самолета 300 км/ч.

Поле яркости изображений МП при ее импульсной оптической подсветке регистрировалось на борту самолета телевизионной системой в стандартном или синхронизированном малокадровом (регистрация отдельного кадра) режимах с аналоговой записью сигнала на видеоманитофон вместе с его временной привязкой к определенной точке на траектории полета, а значит, и к пространственному положению относительно движущегося судна. Последующая оцифровка и статистическая покадровая обработка информации проводились на наземном вычислительном комплексе.

На рис. 1 приведена блок-схема аппаратного комплекса, установленного на борту самолета АН-30. Сигнал с синхроконтрактов малокадровой телекамеры или сигнал автоматического запуска при регистрации в стандартном телевизионном режиме поступает на вход блока управления 2, связанного с блоком питания 1 системы подсветки, и запускает источник излучения (использовалась импульсная лампа с ксеноновым наполнением типа ИФК-150). Параболический отражатель диаметром 450 мм обеспечивает угловую ширину диаграммы направленности источника подсветки – 15°. Длительность импульса подсветки равна 300 мкс, частота следования не более 2 Гц. Одновременно с блока управления 2 поступает импульс идентификации кадра на вход видеоманитофона 3. Видиконная телевизионная камера 5 с блоком питания 4 находится в выбранном режиме регистрации и непрерывной записи сигнала на аналоговый видеоманитофон. Контроль видеоизображения проводится при помощи видеоконтрольного устройства 6. Общее питание аппаратного комплекса осуществляется от бортовой сети через распределительное устройство 7. Поле зрения приемной ТВ системы при использовании штатного объектива составляет 10°×13°, обеспечивает с высоты полета 300 м регистрацию в одном кадре изображения поверхности размером 100×140 м и является близким к оптимальному для приема бликового сигнала от взволнованной морской поверхности в силу физических причин формирования изображения, описанных выше.

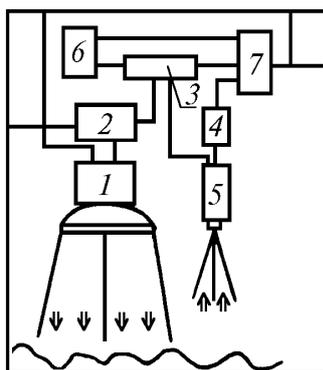


Рис. 1. Блок-схема бортового аппаратурного комплекса

Для обработки аналоговой телевизионной информации, полученной в лётных условиях, использовалась система ввода, оцифровки и предварительной обработки изображения. Запись кадра изображения можно было производить либо программно, либо по синхроимпульсу идентификации записанного кадра. Непосредственная обработка телевизионных изображений морской поверхности производилась видеопроцессором с многофункциональным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), работающим под управлением ЭВМ [9]. При 8-разрядном АЦП осуществлялось квантование ТВ сигнала по 256 уровням. Пространственный размер окна обработки изображения – 512×512 элементов, что определяет не только масштаб исследованных пространственных характеристик структуры взволнованной МП, но и все линейные размеры на исследуемой поверхности с учетом фиксируемых в процессе измерений курса, высоты и скорости полета. В процессе обработки основной интерес представлял сигнал, возникающий в результате отражения импульса подсветки от facets и фиксируемый над уровнем фона, создаваемого рассеянием в воде и атмосфере. Поэтому в процессе обработки использовались различные яркостные срезы по уровню квантования регистрируемого изображения. Для предварительного выбора информативных признаков, позволяющих обнаруживать по изображениям полей яркости МП наличие следа судна, было выбрано и обработано 236 исходных кадров ТВ изображений, представляющих последовательную совокупность зарегистрированных импульсных оптических изображений для 8 рабочих галсов полета самолета.

В основу программного обеспечения специализированного видеопроцессорного комплекса положены алгоритмы вычислений вероятностных характеристик дискретных изображений случайных полей [10]. Программы обработки ТВ изображений импульсного поля яркости МП обеспечивали, в общем случае, вычисление центральных моментов любых порядков и пространственных спектров распределений полей яркости для различных (из 256 возможных) уровней яркостных срезов. В предварительном качественном сравнительном анализе использовались пространственные автокорреляционная и частотная (двумерный Фурье-спектр) функции дискретизированных изображений МП, а также простейшая характеристика распределения бликов на плоскости – эллипс рассеяния. Вычисляемые функции отображались в псевдоцветах на экране цветного монитора в соответствии с последовательностью обработки числовых массивов по каждому кадру на заданном уровне яркостного среза.

Как показал проведенный анализ имеющегося экспериментального материала, с изменением структуры взволнованной МП изменяется и визуальная совокупность бликующих площадок, которая может аппроксимироваться эллипсом. В предположении нормального закона распределения бликов в декартовой системе координат на плоскости изображения оценивались следующие параметры эллипса рассеяния: среднеквадратические отклонения σ_ξ , σ_η – размер осей эллипса в направлениях ξ , η ; угол α , определяющий направление главной оси эллипса, и координаты центра m_x , m_y в системе координат плоскости наблюдения [11]. Для удобства сравнения при обработке координатные оси в плоскости изображения выбирались таким образом, чтобы ордината (ось y) располагалась в направлении движения самолета, а затем проводилась коррективка пространственной ориентации эллипса с учетом курсового угла самолета.

В качестве примера в таблице приведены параметры эллипсов рассеяния для уровня дискретизации сигнала 210 и различных направлений полета: галс N 1 (курс 270°) – движение

навстречу судну, галс N 2 (курс 300°) – пересечение следа на расстоянии около 500 м от кормы судна и галс N 7 (курс 90°) – движение вслед судну. Для каждого галса представлен результат обработки трех кадров изображения, из которых каждый второй относится к области аномальной структуры (турбулентный след) поверхностного волнения. Направление главных осей эллипсов рассеяния совокупности бликов оптического изображения МП пересчитаны к курсовому углу самолета.

Курс, град.	Галс	Номер файла	Направление главной оси эллипса рассеяния (курсовые углы)	Параметры эллипса рассеяния (усл. ед.)	
				σ_{ξ}	σ_{η}
270	1	97	315	$3,7 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^4$
		99	139	$3,9 \cdot 10^3$	$9,4 \cdot 10^2$
		102	197	$5,6 \cdot 10^4$	$4,9 \cdot 10^4$
300	2	200	327	$4,6 \cdot 10^4$	$6,9 \cdot 10^4$
		202	170	$2,8 \cdot 10^2$	$4,4 \cdot 10^3$
		204	326	$1,3 \cdot 10^5$	$6,8 \cdot 10^4$
90	7	901	31	$5,1 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^4$
		904	205	$1,2 \cdot 10^2$	$3,8 \cdot 10^3$
		906	12	$2,3 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$

Как видно из таблицы, величины осей (среднеквадратические отклонения) эллипсов рассеяния в области фоновых волнений незначительно отличаются и соответствуют практически изотропному характеру волнения. В зоне турбулентного следа главные оси уменьшаются почти на порядок, возрастает вытянутость эллипса рассеяния и происходит изменение ориентации главной оси. Такое изменение параметров распределения регистрируемых бликов по площади вызвано тем, что непосредственно за движущимся кораблем возникает достаточно сильное гашение волнения водной поверхности, т.е. образуется локальная гладь. В этом случае большая часть зеркально отражающих площадок ориентирует свои нормали вблизи направления оптической оси приемной системы, изображение источника формируется слаборасходящимися пучками и его видимый размер уменьшается.

Таким образом, при появлении слика на МП эллипс рассеяния для бликовых составляющих изменяет свои параметры в сторону уменьшения и, в случае достаточно гладкой зеркально отражающей поверхности, вырождается в точку, близкую к угловым размерам источника излучения. Такие результаты наблюдались в наших экспериментах над озерами, поверхность которых находилась в практически невозмущенном состоянии. В общем случае такая характеристика структуры взволнованной МП, как эллипс рассеяния, недостаточна для уверенного и достоверного выявления аномалий в фоновой структуре МП при импульсной подсветке последней. Эта характеристика может быть использована в зоне турбулентного следа, возникающего при движении судна, в участках следа, мало удаленных от кормы, и там, где имеется выраженная анизотропия структуры поверхностного волнения.

Вычисления и анализ пространственных Фурье-спектров, получаемых на основе использования стандартных алгоритмов двумерного быстрого преобразования Фурье (ДБПФ), популярных при дистанционных исследованиях параметров волнения методом аэрофотосъемки в дневных условиях [2], также показали их недостаточную эффективность в решении данной проблемы. Это связано прежде всего со спецификой изображения импульсного поля яркости МП, когда основную роль играет пространственное распределение бликов отраженного сигнала. Разрывы в функции яркости изображения МП приводят к появлению в спектре больших составляющих с высокими пространственными частотами.

Кроме того, при сильном сглаживании поверхности в области аномалий, когда число бликов и общая площадь, занимаемая ими, уменьшается, пространственная частотная функция (ПЧФ) в значительной степени сохраняет подобие и не имеет выраженных информативных характеристик. Анализ полученного экспериментального материала показал, что действительно существует значительное перекрытие ПЧФ для полей яркости поверхностей, заметно отличающихся друг от друга, и ПЧФ без специальной обработки не несет каких-либо дополнительных информативных признаков по сравнению с эллипсом рассеяния. Если считать, например, информативным признаком масштаб пространственного спектра (т.е. его размер на

окне обработки 512×512 элементов), который для некоторых участков турбулентного следа изменяется, то подобную информацию о наличии следа можно получить и из параметров эллипсов рассеяния. Если учесть, что вычислительные затраты в первом и во втором случае несоизмеримы по времени и по необходимым вычислительным ресурсам, то можно утверждать, что использование ПЧФ для получения информации о структуре МП в условиях импульсной подсветки скорее всего нецелесообразно.

Другая характеристика, выбранная нами для анализа изображения импульсного поля яркости МП, – пространственная автокорреляционная функция. Она вычисляется для каждой точки (ξ, η) на числовом массиве $(2N + 1) \times (2N + 1)$ элементов изображения при последовательном смещении $k, l = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \pm T$:

$$R(k, l; \xi, \eta) = \frac{\sum_{m=\xi-N}^{\xi+N} \sum_{n=\eta-N}^{\eta+N} g(m, n) g(m-k, n-l)}{\sum_{m=\xi-N}^{\xi+N} \sum_{n=\eta-N}^{\eta+N} [g(m, n)]^2}.$$

Из общих свойств корреляционных функций следует, что при фиксированном сдвиге (k, l) большее значение пространственной автокорреляционной функции (ПАКФ) будет соответствовать области крупномасштабного волнения. Таким образом, масштаб волнения пропорционален ширине ПАКФ и описание структуры поверхности можно осуществлять с помощью статистических параметров, связанных с абсолютными статистическими моментами корреляционных функций.

Проведенный анализ экспериментальных данных показал, что ПАКФ изображения поля яркости МП имеет наибольшую чувствительность при изменении структуры волнения, а при переходе от области фоновых волнений к области аномалий и следов часто происходит кластеризация изображения ПАКФ. По мере удаления от источника возмущений под влиянием ветровой структуры вновь возникает высокочастотная составляющая волнения и происходит сглаживание больших масштабов.

На рис. 2 и 3 в качестве примера приведен фрагмент последовательной обработки видеofilm (цифровое изображение МП, пространственные Фурье-спектр и автокорреляционная функция изображения МП), полученного в эксперименте при движении самолета навстречу кораблю. Первая тройка этой серии (рис. 2) соответствует изображению поля яркости МП и его пространственных характеристик перед носом корабля, вторая (рис. 3) – за кормой. Последующие иллюстрации (рис. 4) представляют только ПАКФ изображения МП для той же реализации, что и рис. 2 и 3 в зоне возмущений по мере удаления от кормы корабля (для ПАКФ фрагмент совокупной последовательности дан на рис. 2, в, 3, в и далее на 4 сверху вниз). Следует заметить, что каждый из используемых кадров изображения имеет однозначный смысл как фрагмент пространственного изображения МП с соответствующим положением относительно движущегося судна.

Примеры корреляционных функций структуры взволнованной МП в различных областях возмущения для других трех галсов приведены соответственно на рис. 5 – 7.

Кадры для одного галса расположены в следующем порядке: верхний снимок пары фрагментов обработки видеofilm соответствует невозмущенной (фоновой) взволнованной МП, нижний снимок – области аномального волнения в зоне турбулентного следа за кормой корабля.

На рис. 5 приведены ПАКФ для галса N 1, курс 270° – движение навстречу судну. Рис. 6 и 7 воспроизводят соответственно аналогичные данные для галса N 2, курс 300° – пересечение следа на расстоянии около 500 м от кормы судна и галса N 7, курс 90° – движение вслед судну.

Из этих данных достаточно наглядно видна реакция ПАКФ изображения импульсного поля яркости МП на изменение структуры волнения. Таким образом, пространственная автокорреляционная функция, найденная по изображениям дискретного поля яркости взволнованной морской поверхности в условиях импульсной подсветки, может дать возможность оперативно оценивать структуру МП. Рассмотренные в процессе анализа экспериментальных данных варианты образцов ПАКФ позволяют предположить, что в качестве главного и наиболее характерного признака ПАКФ фонового волнения может быть использована центральная часть плоской сингулярной фигуры отображения результатов расчета.

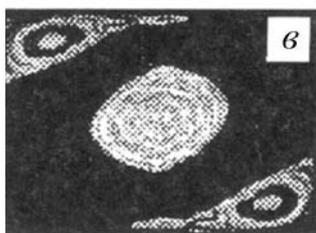
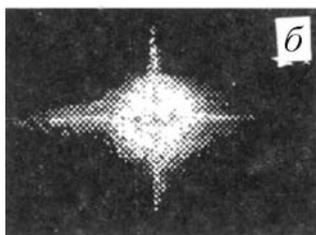


Рис. 2. Изображение МП, ПЧФ и ПАКФ в области фоновых волнений

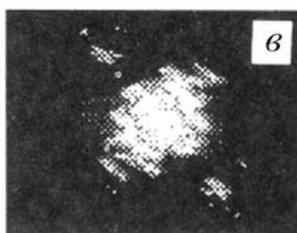
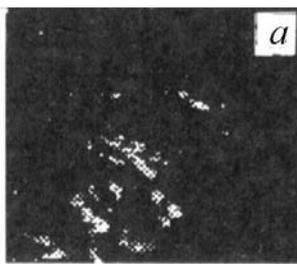


Рис. 3. Изображение МП, ПЧФ и ПАКФ в области следа



Рис. 4. Изображение ПАКФ в области следа по мере удаления от кормы

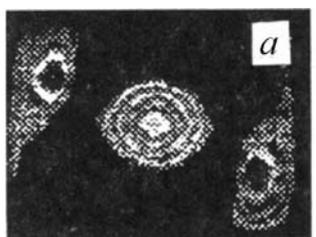


Рис. 5. Изображение ПАКФ в фоновой области и в зоне следа (движение навстречу судну)

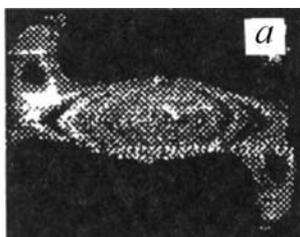


Рис. 6. Изображение ПАКФ в фоновой области и в зоне следа (пересечение курса на расстоянии 500 м от кормы)



Рис. 7. Изображение ПАКФ в фоновой области и в зоне следа (движение вслед судну)

Для ПАКФ фонового волнения совокупность линий, разграничивающая области отображения с одинаковыми уровнями яркости, при сдвигах $0 \leq (k, l) \leq 170$ отсчетов, по-видимому, в большинстве случаев может быть аппроксимирована кривыми второго порядка. Конфигура-

ции линий равной яркости для сдвигов $(k, l) > 170$ принимают различные формы, при этом области корреляции противоположных точек изображений могут быть связанными или оторванными от центрального фрагмента фигуры ПАКФ фонового волнения. Картины ПАКФ фонового волнения содержат, в подавляющем большинстве случаев, не более двух симметрично расположенных фрагментов для больших сдвигов (k, l) . Проведенный в рамках данного эксперимента анализ дает возможность осуществить простейшую классификацию корреляционных функций. На рис. 2, в, 5, а, 6, а, 7, а показаны типичные результаты расчетов ПАКФ для фоновых изображений МП при импульсной подсветке.

Поскольку основные информационные характеристики структуры взволнованной морской поверхности, полученные в результате обработки ее оптического изображения при импульсной вертикальной подсветке, связаны не с энергией отраженного излучения, а с пространственным расположением бликующих площадок, целесообразно провести преобразование исходного изображения (за вычетом фона рассеянного излучения) в бинарное пространственное распределение, т.е. 0 – при отсутствии блика на элементе изображения и 1 – при его появлении. Эта операция легко реализуется при вводе и оцифровке изображения, существенно упрощает дальнейшую обработку и дает возможность проводить расчет пространственной автокорреляционной функции с помощью быстродействующих микропроцессоров. Проведенная нами численная обработка зарегистрированных видеоизображений подтвердила эффективность указанного алгоритма и возможность его использования для обработки оптических сигналов в реальном времени. Бинарный оптический сигнал также просто фильтруется от искажающего влияния рассеивающей атмосферы, поскольку внешний масштаб изображения (низкочастотная составляющая оптического сигнала) искажается атмосферой в наименьшей степени.

В целом можно сделать вывод, что использование пространственной автокорреляционной функции оптического изображения как информационного признака для обнаружения аномалий в фоновой структуре взволнованной морской поверхности при импульсной подсветке последней может оказаться достаточно перспективным. При этом необходимая классификация ПАКФ для различных областей волнения с целью создания систем автоматического распознавания аномалий на взволнованной МП должна являться предметом отдельного обсуждения по результатам детальных натурных экспериментальных исследований.

1. Оптика океана / Под ред. А.С. Моница. М.: Наука, 1983. Т. 2. 236 с.
2. Загородников А.А. Радиолокационная съемка морского волнения с летательных аппаратов. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 239 с.
3. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 375 с.
4. Бункин Ф.В., Воляк К.И., Маляровский А.И. и др. // ДАН СССР. 1985. Т. 281. N 6. С. 1441–1445.
5. Бондур В.Г. // Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. С. 217–230.
6. Мурынин А.Б., Лупян Е.А. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 3. С. 299–305.
7. Бондур В.Г., Борисов Б.Д., Генин В.Н. и др. // Перенос изображения в земной атмосфере. Томск: ТФ СО АН СССР, 1988. С. 42–45.
8. Сох С., Мунк В. // J. Opt. Soc. Amer. 1954. V. 44. N 11. P. 838–850.
9. Журавлев В.И., Шинкевич С.Л., Гриднев В.А. и др. // Проблемно-ориентированные измерительно-вычислительные комплексы. Новосибирск: Наука, 1986. С. 58–62.
10. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Т. 1. 312 с. Т. 2. 480 с.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1973. 832 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
6 декабря 1994 г.

B. D. Borisov, V. A. Krutikov. About Remote Location of Space Anomalies of Wavy Sea Surface.

The tentative experimental results of remote diagnosis at dark of wavy sea surface state using airborne instrumentation are discussed in the paper. The results are obtained by means of frame by frame statistical processing of TV images taken at illuminating the sea surface by direct optical pulse.

The estimates of space amplitudinal, frequency, and autocorrelation functions of the images structure are treated and compared by informative signs at background wind disturbance and inside the wake of a moving ship.