

С.Ф. Баландин, И.А. Зинкин, Ю.Д. Копытин,  
С.В. Лазарев, О.Г. Новиков, С.Т. Мамыргазиев

## ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Сообщаются результаты разработки и апробации когерентного лидара на основе полупроводникового и газового ( $\text{CO}_2$ ) лазеров для детектирования поверхностных капиллярных волн. Получены гистограммы спектров рассеяния света морским прибором. Экспериментально показана возможность регистрации микроволнения с амплитудами, меньшими на порядок величины длины волны зондирующего излучения.

Дистанционные лазерные измерения являются одним из перспективных направлений оптической волнографии [1–3]. В большинстве методик зондирующий импульс направляется под малыми углами к горизонту, что позволяет по размытию отраженного сигнала определить статистику наклонов элементов волн в диапазоне основных энергонесущих частот  $\Omega \lesssim 10^{-1}$  Гц.

В настоящей работе сообщаются результаты разработки и апробации когерентно-оптического метода детектирования высокочастотной составляющей спектров морского волнения, соответствующей области капиллярных поверхностных волн. Интерес к капиллярным волнам, которые можно отнести к классу нелинейных, обусловлен их важной ролью в качестве индикатора различных гидродинамических процессов в океане [4].

Принцип действия созданного волнового лидара состоит в следующем. Луч полупроводникового лазера, направленный вертикально вниз, освещает водную поверхность, импульсами с частотой  $\Omega = 20$  кГц. В поле светового «пятна» формируется случайный набор площадок возвышений поверхности, отражающих свет в направлении фотоприемника. Анализатор разлагает его в спектр элементарных частот.

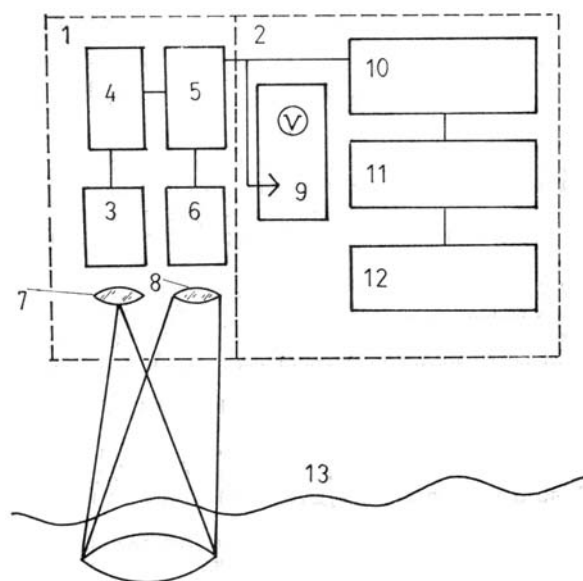


Рис. 1. Блок-схема волномерного лидара

Блок-схема волномерного лидара представлена на рис. 1. Она состоит из блока приемопередатчика 1 на базе серийного прибора типа ППУ-1 и блока обработки 2. Приемопередатчик представляет собой систему из лазерного диода 3, модулятора 4 и демодулятора 5 лазерного излучения, фотодиода 6. Лазерный диод 3 индуцирует излучение с длиной волны  $\lambda = 0,93$  мкм, длительностью импульса на полувысоте  $\tau = 100$  нс и пиковой мощностью  $P = 4$  Вт. С помощью коллиматора 7 излучение формируется в телесном угле  $\approx 8^\circ$ . Прием рассеянного излучения осуществлялся с помощью коллиматора приемной системы 8, собирающей излучение в телесном угле  $15^\circ$  и направляющей его на фотодиод. Оптические оси приемной и передающей систем находятся на расстоянии 5 см. Апертура коллиматора передатчика составляет 1 см, апертура приемника 4 см. Усиленный сиг-

нал поступает одновременно на осциллограф 9 и анализатор параллельного типа 10. Полоса пропускания последнего лежит в пределах от 20 до 20000 Гц. Анализатор через согласующее устройство 11 связан с самопишущим потенциометром 12.

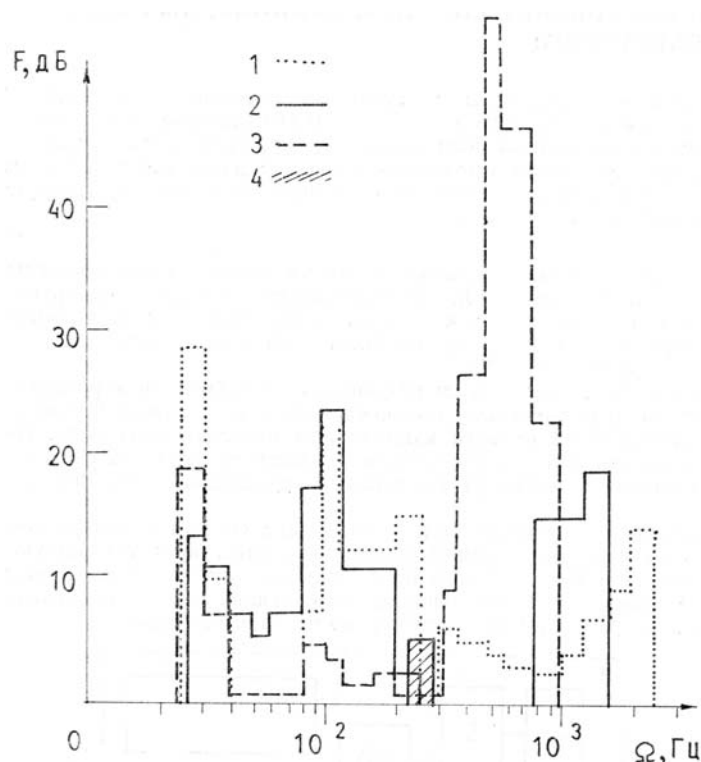


Рис. 2. Примеры энергетических спектров капиллярных волн прибрежной зоны Черного моря.  $T_B^0 = 17^\circ\text{C}$ ;  $P = 760$  мм рт. ст.;  $T_{\text{атм}} = 22$ . 1 — скорость ветра 0,9 м/с, 2 — 7,0 м/с, 3 — 8,0 м/с, 4 — фоллиаж прибрежной зоны: 1 —  $B = 1$  балла; 2 —  $B = 4$  балла; 3 —  $B = 2$  балла

Прибор может устанавливаться на борту судна. Апробация лидара проводилась на платформе, установленной на естественной скале. С помощью выдвижной штанги лидар выносился в море на расстояние до 5 м. Расстояние до поверхности моря  $l_3$  составляло  $h_0 \approx 2$  м, диаметр пятна облучения  $d_{\text{обл}} = 0,24$  м, глубина моря в исследуемом месте  $h_1 \approx 2,5$  м.

Параллельно проводились метеорологические наблюдения с помощью автоматической переносной метеостановки.

На рис. 2 приведены примеры гистограмм спектров капиллярных волн, измеренные для нескольких значений балльности волнения моря. Видно, что при изменении волнения моря от 1 до 3 баллов амплитуда сигнала в области частот  $\approx 0,9$  кГц возрастает приблизительно на 50 дБ.

Из приведенных экспериментальных данных следует также, что в спектре капиллярных волн морского прибоя имеются три устойчивых максимума в частотных интервалах с центрами 25;  $10^2$ ;  $(0,6 \div 2,5) \cdot 10^3$  Гц. При увеличении балльности наблюдается относительное снижение спектральных амплитуд низкочастотных и соответственно возрастание высокочастотных максимумов. Для сравнения на рис. 2 показан пример спектра рассеянного излучения от фоллиажа прибрежной зоны. Высокочастотный спектр рассеянного излучения связывается с капиллярными волнами, обусловленными турбулентностью воды в зоне прибоя, а также с содержанием в приповерхностном слое пенных образований и гидрозолей. Относительная роль последних может быть установлена лишь в сопоставлении с измерениями вдали от береговой зоны при наличии обрушивающихся ветровых волн.

Следует отметить, что использованный в когерентном лазерном волномере полупроводниковый лазер не является оптимальным источником излучения, так как существенно уступает по степени пространственно-временной когерентности, например газовым лазерам низкого давления.

С целью определения достижимой пороговой чувствительности метода когерентно-оптического детектирования балльности волнения проведена серия модельных экспериментов в искусственном водоеме с калиброванным источником капиллярных волн. При этом в качестве излучателя использовался высокостабилизированный непрерывный одномодовый  $\text{CO}_2$ -лазер  $\lambda = 10,6$  мкм) со средней мощностью генерации 1 Вт. Система автостабилизации параметров установки и принцип регистрации отраженного сигнала с внутрирезонаторным гомодинным приемом изложены в [5]. Достигнутая относительная нестабильность частоты генерации излучателя составила  $10^{-11}$ .

На рис. 3 приведена зависимость измеренного уровня сигнала фотоприемника от амплитуды волны. Обнаружен максимум на кривой, который наблюдается в случае, когда высота возбуждаемых волн соответствует четверти длины волны генерации лазера.

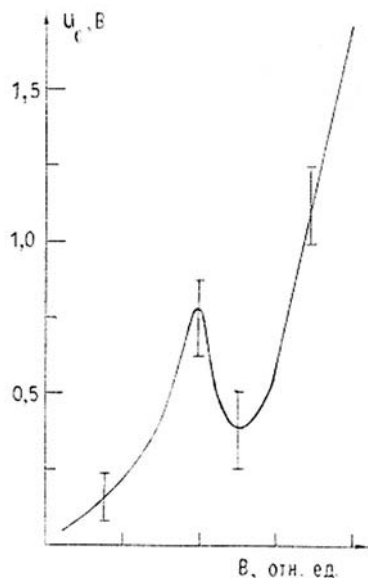


Рис. 3. Зависимость сигнала фотоприемника когерентного волномера от амплитуд (балльности) поверхностного волнения на частоте  $\Omega = 250$  Гц

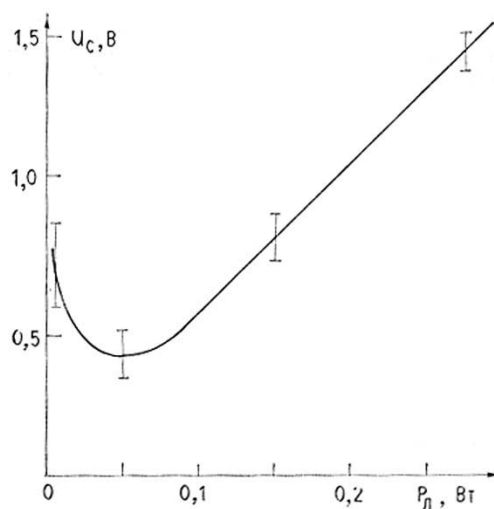


Рис. 4. Зависимость сигнала когерентного волномера от мощности лазерного источника при регистрации сигнала, отраженного от водной поверхности для фиксированной амплитуды и частоты капиллярных волн

На рис. 4 представлена зависимость сигнала фотоприемника когерентного волномера от величины генерируемой мощности лазера. Увеличение сигнала при минимальной мощности генерации объясняется тем, что когерентный лидар с внутрирезонаторным приемом наиболее чувствителен к внешнему воздействию при мощности накачке, близкой к пороговому значению начала генерации. Монотонная зависимость величине сигнала фотоприемника при мощностях, больших 60 мВт, обусловлена увеличением излучения, отраженного от водной поверхности. Пороговая чувствительность к амплитудам поверхности волн определялась уровнем электрических шумов регистрирующей системы и достигала значений порядка  $\lambda \cdot 10^{-1}$ , а соответствующая вольтовая чувствительность порядка  $10^{+4}$  В/см.

Таким образом, применение метода и аппаратуры когерентных лидаров обеспечивает сверхчувствительное детектирование параметров морского волнения в высокочастотной области спектра.

В заключение авторы выражают благодарность В.Е. Зуеву, Г.М. Крекову, И.В. Самохвалову и Ли М. Ен-Гон за полезные обсуждения результатов работы.

1. Оптика океана. Ч. II /Под ред. А.С. Мони́на. — М.: Наука, 1983. — 236 с.
2. Гришин А.П., Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В. — В кн.: Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. — Новосибирск: Наука, 1979, с. 140—147.
3. Самохвалов И.В., Копытин Ю.Д., Ипполитов И.И. и др. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности. — Новосибирск: Наука, 1987. — 210 с.
4. Мони́н А.С., Красицкий А.П. Явления на поверхности океана. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 374 с.
5. Горячев П.В., Лазарев С.В. — В кн.: VIII Всес. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. Ч. II. — Томск: Изд. ТФ СО АН СССР, 1986, с. 240—241.

Институт оптики атмосферы  
СО АН СССР, Томск

Поступило в редакцию  
3 марта 1988 г.

S.F. Balandin, I.A. Zinkin, Yu.D. Kopitin, S.V. Lasarev, O.G. Novikov, S.T. Mamirgaziev. **Laser Sounding of Capillary Wave Spectra on the Sea Surface.**

A coherent lidar with a semiconductor laser and a gas ( $\text{CO}_2$ ) laser was developed and used for detecting capillary waves on the sea surface. The design features and field test results are discussed. Light scattering histograms by surf are presented. The experiments show the feasibility of monitoring wave oscillations whose amplitudes are by an order of magnitude smaller than the probe laser wavelength.