

УДК 621.391

М.В. БОРЦОВА, Д.Ю. КОЗАЧЕНКО, А.В. ПОПОВ, Я.И. ДОЛЖЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для экспериментальных исследований профиля водной поверхности предложена конструкция лазерного волнографа, принцип работы которого основан на измерении угла преломления лазерного луча при прохождении границы вода-воздух. Разработан лабораторный генератор квазисинусоидальных волн, позволяющий формировать волны на поверхности воды с частотой от 0,1 до 15 Гц и амплитудой до 3 см. Предложена методика проведения экспериментальных исследований, методика обработки полученных экспериментальных данных и метод восстановления профиля водной поверхности. Исследована возможность построения математической модели поверхности по результатам дистанционных измерений ее профиля.

Ключевые слова: моделирование, профиль поверхности, преломление, лазерный волнограф, генератор волн, рекурсивная фильтрация

Введение

В настоящее время на Украине наблюдается тенденция к росту уровня урбанизации и увеличению антропогенной нагрузки на окружающую среду [1]. Развитие опасных в экологическом смысле производств (энергетики, черной и цветной металлургии, химической и нефтехимической промышленности), чрезмерная концентрация людей и автомобильного транспорта в городах, увеличение объема отходов, сбрасываемых коммунально-хозяйственными службами – все это неизбежно приводит к загрязнению поверхностных и подземных вод.

Наиболее существенными факторами загрязнения водных акваторий являются сброс сточных вод в водоемы промышленными и коммунальными предприятиями, загрязнения, связанные с животноводством и обслуживанием сельского хозяйства, поступающие через коллекторы сточных вод, сток с сельскохозяйственных угодий [1, 2]. Также за последние годы значительно участились случаи разливов нефти и нефтепродуктов (например, авария в Керченском проливе в ноябре 2007 г., когда в результате крушения танкера «Волгонефть-139» в воду попало 2 тыс. тонн мазута).

С целью обеспечения сбора, обработки, сохранения и анализа информации о состоянии окружающей природной среды, прогнозирования ее изменений и разработки научно обоснованных рекомендаций для принятия эффективных управленческих решений на Украине создается система государственного мониторинга окружающей природной среды [3]. Эффективным средством при решении задач экологического мониторинга являются сред-

ства аэрокосмического дистанционного зондирования Земли, которые обеспечивают возможность обзора больших территорий и позволяют получать информацию о различных объектах и процессах на расстоянии, без непосредственного контакта с ними. Наиболее перспективными являются радиолокационные исследования, так как они обеспечивают возможность работы в любых погодных условиях и в темное время суток [4, 5].

Наличие загрязняющих веществ в водоемах вызывает изменение электрофизических свойств (диэлектрической проницаемости и проводимости) воды или изменение структуры волнения. Так, например, разливы нефти приводят к образованию устойчивых стационарных пленок с толщинами порядка долей миллиметра, в результате чего под воздействием ветра возникает вязкое волновое движение, отличающееся по своим характеристикам от волнения в чистой воде [6].

Многочисленные теоретические исследования [7, 8] показывают, что отраженный шероховатой поверхностью радиолокационный сигнал может быть определен следующим образом:

$$\dot{S} = (\sqrt{4\pi})^3 \left(\frac{1}{\lambda^2} \right) \cdot M \cdot \iint_{\Pi} h(x, y) \cdot \cos(\vartheta) \times \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(x, y)\right) dx dy, \quad (1)$$

где λ – длина излучаемой электромагнитной волны; $M = M(\varepsilon, \sigma, \vartheta, \{H, V\})$ – нормировочный коэффициент, зависящий от диэлектрической проницаемости ε , проводимости σ , угла прихода электромагнитной вол-

ны ϑ и поляризации излучения и приема $\{H, V\}$ [7]; Π – поверхность, участвующая в формировании отраженного сигнала; $h(x, y)$ – функция распределения высот поверхности; ϑ – угол падения волны на поверхность; $\Delta R(x, y)$ – разность между расстояниями до точек x, y и до центра выбранной площадки поверхности.

Из (1) следует, что сигнал, отраженный поверхностью воды, определяется ее профилем и электрофизическими свойствами, что создает предпосылки для разработки алгоритмов дистанционного обнаружения, распознавания и картографирования загрязненных областей.

Для исследования возможности классификации загрязнений водных акваторий по данным дистанционного зондирования и выявления информативных признаков для их распознавания требуется большой объем экспериментальных данных, полученных для различных типов загрязнений различными радиолокационными станциями в различных условиях съемки. При этом данные с аэрокосмических носителей должны сопоставляться с данными наземного контроля, полученными контактными методами.

Сложность проведения широкомасштабных натурных экспериментов обуславливает необходимость математического моделирования радиолокационных сигналов, отраженных водной поверхностью. При этом возникают две задачи – моделирование шероховатой поверхности с учетом ее гидродинамических свойств и расчет отраженных радиолокационных сигналов.

В работах [9 - 11] был предложен метод моделирования протяженных многомасштабных шероховатых поверхностей с заданной пространственной корреляционной функцией высот [12], основанный на теории векторной рекурсивной фильтрации [13], и методика расчета отраженных радиолокационных сигналов с учетом технических характеристик радиолокационной станции [14]. Для построения адекватных моделей водной поверхности необходима информация о ее динамических свойствах и пространственной корреляционной структуре. Такая информация может быть получена путем измерения профиля водной поверхности при помощи волнографа [15], при этом экспериментальные исследования могут проводиться на небольших участках водной поверхности или в лабораторных условиях с последующим обобщением полученных результатов на большие акватории (например, морскую поверхность).

Целью данной работы является исследование возможности построения математической модели поверхности по результатам дистанционных изме-

рений ее профиля.

1. Аппаратура для экспериментальных исследований профиля водной поверхности

1.1. Лазерный волнограф

Для исследования структуры волнения водной поверхности в работе [15] была предложена конструкция лазерного волнографа, принцип действия которого основан на измерении угла преломления лазерного луча при прохождении границы раздела вода-воздух.

Известно [16], что при падении электромагнитной волны под некоторым углом φ на плоскую границу раздела двух сред возникает преломленная волна, ориентированная под углом ψ относительно нормали к поверхности. Согласно закона Снеллиуса [16], углы падения φ и преломления ψ связаны следующим образом:

$$\sin \psi = \frac{n_w}{n_a} \cdot \sin \varphi, \quad (2)$$

где n_w – коэффициент преломления воды, который определяется диэлектрической проницаемостью ε_w , проводимостью σ_w и длиной волны λ_w как

$$n_w = \sqrt{\varepsilon_w - j \frac{\lambda_w \sigma_w}{2\pi}}; \quad n_a = \text{коэффициент преломления воздуха, } n_a = \sqrt{\varepsilon_a - j \frac{\lambda_a \sigma_a}{2\pi}}.$$

Если источник лазерного излучения расположен таким образом, что луч ориентирован строго вертикально, то при отсутствии волн на водной поверхности угол падения на границу раздела сред составляет 0° . Из (2) следует, что угол преломления также равен 0° , то есть отклонения преломленного светового луча не происходит (рис. 1, а). Если в результате наклона поверхности лазерный луч падает на границу раздела под некоторым углом φ , то угол преломления ψ отличен от нуля и наблюдается отклонение луча (рис. 1, б), которое может быть измерено при помощи оптического датчика.

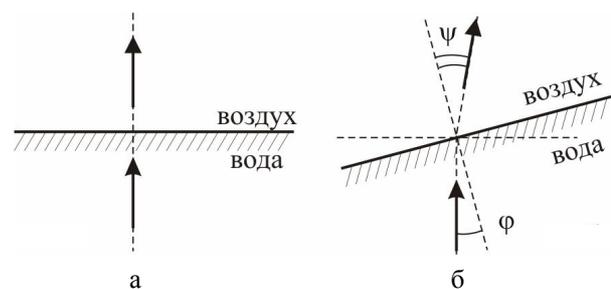


Рис. 1. Преломление луча на границе раздела вода – воздух: а – нормальное падение;

б – падение под углом φ

Используемый в данной работе лазерный волнограф (рис. 2, 3) состоит из источника лазерного излучения, датчика, блока усиления и преобразования в цифровой код, канала передачи данных и ЭВМ. Датчиком является 4х канальный фотоэлектрический преобразователь, который представляет собой совокупность фотодиодов, расположенных крестообразно (рис. 4). Такое расположение приемников лазерного излучения обеспечивает регистрацию углов наклона водной поверхности в двух ортогональных направлениях (продольном и поперечном). Пары фотодиодов $\{VD_1, VD_3\}$ и $\{VD_2, VD_4\}$ (рис. 4) формируют суммарные и разностные диаграммы направленности (рис. 5). Расстояние между фотодиодами подобрано таким образом, чтобы обеспечить однозначное восстановление углов наклона поверхности в двух плоскостях. Предлагаемая конструкции датчика одновременно обеспечивает высокую точность и однозначность измерений.

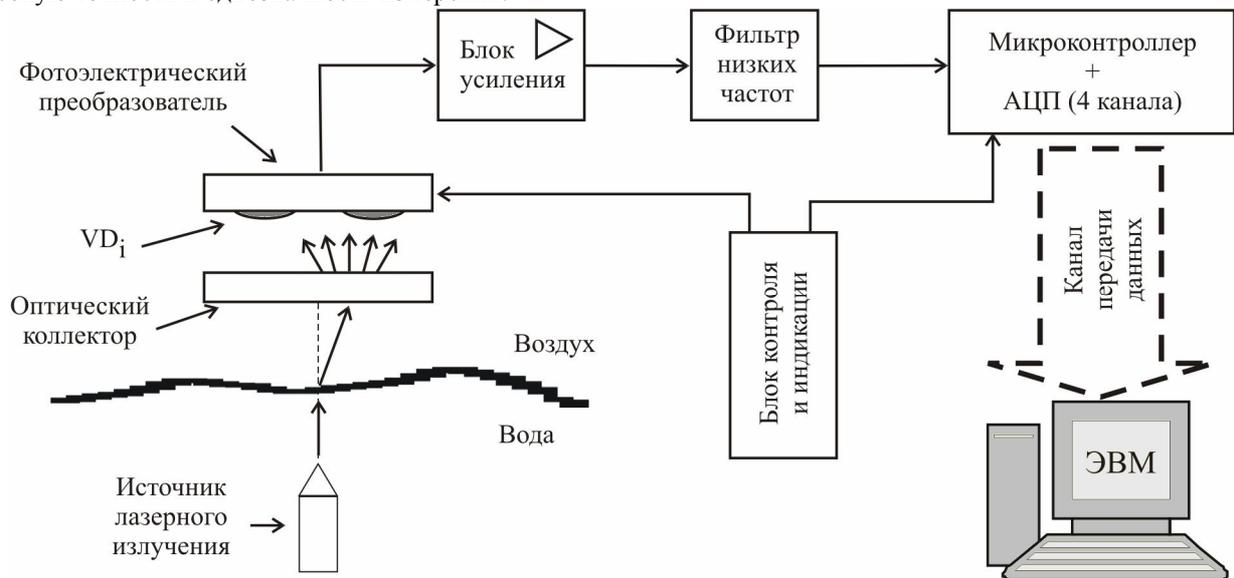


Рис. 2. Структурная схема лазерного волнографа

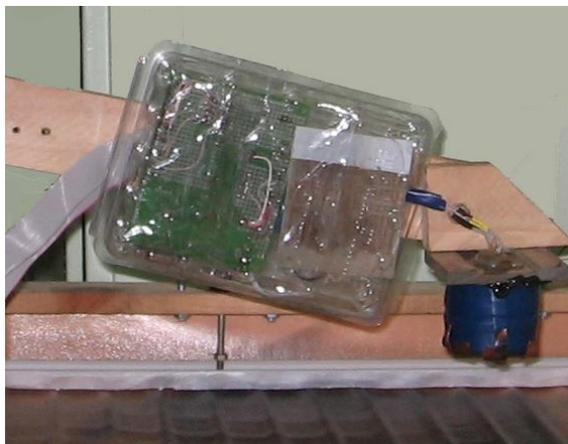


Рис. 3. Общий вид лазерного волнографа

Лазерный луч, излученный источником и рассеянный с помощью оптического коллектора, попадает на фотоэлектрический преобразователь. Фотодиоды $VD_1 - VD_4$ преобразуют оптический сигнал в электрический; амплитуда этого сигнала может составлять от 1 до 50 мкВ в зависимости от угла преломления луча при прохождении границы раздела вода-воздух. Полученный сигнал в каждом из 4-х каналов усиливается до напряжения опорного питания, фильтруется фильтрами низких частот с целью устранения высокочастотных помех, которые могут присутствовать в сигнале, и с помощью многоканального 10-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), интегрированного в микроконтроллер АТмега 8535, преобразуется в цифровую форму. Цифровые сигналы при помощи того же микроконтроллера группируются в пакеты и передаются посредством канала передачи данных в ЭВМ, где осуществляется их обработка и запись.

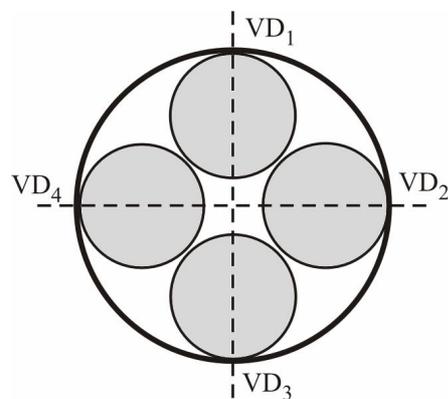


Рис. 4. Фотоэлектрический преобразователь (вид снизу)

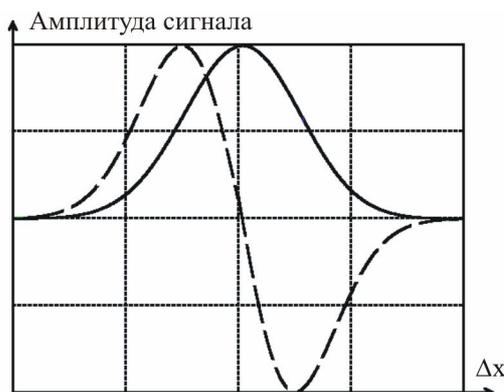


Рис. 5. Общий вид разностной (сплошная линия) и суммарной (пунктирная линия) характеристик

В данной экспериментальной установке был использован проводной параллельный канал передачи данных, который представляет собой 10-ти разрядную шину, 2 бита которой являются управляющими, а 8 бит используются для передачи данных. Такой канал обеспечивает скорость передачи до 10 кбайт/с. При исследованиях в открытых акваториях может быть использован радиоканал.

1.2. Генератор квазисинусоидальных волн

В том случае, когда экспериментальные исследования профиля водной поверхности проводятся в лабораторных условиях, необходим волногенератор. В [17] предложен лабораторный генератор синусоидальных волн, состоящий из блока питания, генератора управляющих импульсов с контроллерным управлением, блока усиления и исполнительного органа – волнопродуктора (рис. 6).

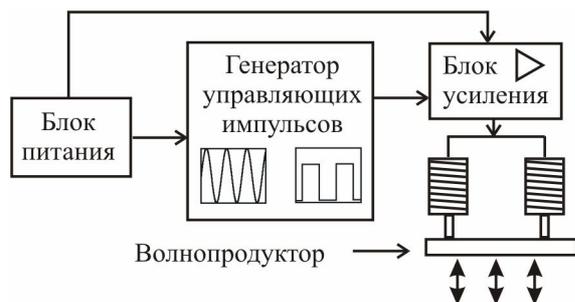


Рис. 6. Структурная схема генератора синусоидальных волн

В качестве генератора управляющих импульсов может быть использован любой генератор, позволяющий формировать синусоидальный сигнал или сигнал в виде меандра. В данной серии экспериментов был использован генератор прямоугольных импульсов, реализованный на базе микроконтроллера ATiny 2313. Он позволяет формировать прямоугольные импульсы с частотой от 0,1 до 15 Гц. Управление генератором осуществляется при помощи клавиатуры. Частота формируемых импульсов

регулируется с шагом 0,1 Гц, текущее значение выводится на семисегментные индикаторы.

Усиленные управляющие импульсы поступают на исполнительный орган, реализованный в виде двух катушек индуктивности и узкого длинного поплавка, закрепленного на металлических штырях (рис. 7). Импульсное магнитное поле, возникающее в катушках в результате протекания переменного тока, втягивает и отпускает штыри, в результате чего поплавок совершает поступательные движения и, ударяясь о поверхность воды, формирует волны.

Разработанный генератор предназначен для формирования волн на водной поверхности небольшой площади (1,5 – 2 м²) с толщиной водного слоя 3 – 10 см и позволяет генерировать бегущую волну с амплитудой до 3 см.



Рис. 7. Общий вид волнопродуктора

2. Методика проведения экспериментальных исследований

Установка для экспериментальных исследований профиля водной поверхности в лабораторных условиях состоит из лазерного волнографа, закрепленного на штативе, генератора синусоидальных волн с контроллерным управлением и емкости с водой, установленной на поворотной платформе.

Источник лазерного излучения помещен под емкостью, в центре которой выполнено отверстие, герметично закрытое стеклом. Так как лазерный луч всегда ориентирован нормально к границе раздела воздух-стекло то, проходя путь излучатель-воздух-стекло-вода, он не претерпевает искажений, и угол падения на границу стекло-вода составляет 0°. Поворотная платформа позволяет наклонять емкость на произвольный угол с точностью до десятой доли градуса.

Для проведения экспериментальных исследований предлагается следующая методика:

- емкость для воды устанавливается горизонтально при помощи уровня;
- осуществляется юстировка лазерного волнографа: лазерный луч должен быть ориентирован нормально относительно дна емкости с водой, оптический датчик установлен горизонтально, а центр луча должен попадать в центр датчика;
- положения излучателя и датчика фиксируются при помощи элементов крепления;
- емкость заполняется водой;
- для каждого канала при фиксированной освещенности путем наклона емкости с водой при помощи поворотной платформы измеряются калибровочные характеристики, представляющие собой зависимость амплитуды сигнала от угла наклона;
- по полученным калибровочным характеристиками определяется рассогласование в каналах фотоэлектрического преобразователя и фиксируются нормировочные коэффициенты;
- подбирается частота управляющих импульсов генератора синусоидальных волн таким образом, чтобы на поверхности воды образовалась бегущая волна;
- оценивается средняя фазовая скорость волн;
- осуществляется измерение профиля поверхности.

Результаты измерений в кодах АЦП сохраняются в файл. При помощи ЭВМ фиксируется время начала и конца измерений с точностью до сотых долей секунды, что позволяет с высокой точностью определить частоту дискретизации [13].

3. Методика обработки экспериментальных данных

Методика обработки экспериментальных данных заключается в следующем. Осуществляется пересчет калибровочных характеристик, представляющих собой зависимость амплитуды сигнала в каналах от угла наклона емкости с водой, в зависимость амплитуды сигнала от смещения лазерного луча относительно центра оптического датчика.

На рис. 8 представлена геометрия установки при калибровке лазерного датчика. Смещение лазерного луча определяется как

$$\Delta x = H_B \cdot \text{tg}(\varphi) + (H_D - H_B) \cdot \text{tg}(\varphi + \psi), \quad (3)$$

где H_B – уровень воды в емкости; H_D – высота оптического датчика относительно дна емкости; φ – угол наклона емкости с водой, который соответствует углу падения лазерного луча на границу раздела вода-воздух (рис. 8); ψ – угол преломления.

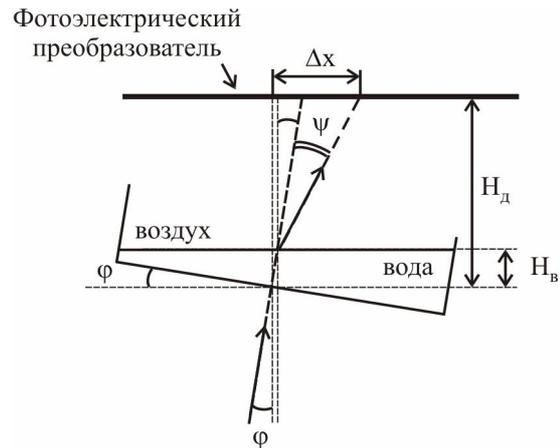


Рис. 8. Геометрия установки при калибровке лазерного волнографа

С целью обеспечения маленького шага дискретизации по уровню при восстановлении мгновенных значений углов наклона водной поверхности, осуществляется аппроксимация [18] калибровочных характеристик функциями вида:

$$f_i(x) = \exp\left\{-\frac{(x - m_i)^2}{\sigma_i}\right\}, \quad (4)$$

где i – номер канала, $i = 1..4$; x – смещение лазерного луча; m_i и σ_i – коэффициенты, которые определяются в ходе аппроксимации.

По полученным аппроксимированным зависимостям осуществляется расчет суммарных и разностных характеристик для ортогональных пар фотодиодов:

$$\{VD_1, VD_3\} \text{ и } \{VD_2, VD_4\}.$$

На следующем этапе выполняется обработка данных, полученных в процессе измерения профиля водной поверхности, в результате чего по суммарным и разностным характеристикам определяются смещения лазерного луча Δx .

Полученные смещения пересчитываются в углы наклона поверхности воды в соответствии с геометрией установки при проведении измерений профиля (рис. 9) как

$$\varphi = \arctg \left[\frac{\sin \left(\arctg \left(\frac{\Delta x}{H_D - H_B} \right) \right)}{\frac{n_w}{n_a} - \cos \left(\arctg \left(\frac{\Delta x}{H_D - H_B} \right) \right)} \right]. \quad (5)$$

По полученным углам наклона поверхности вычисляются мгновенные высоты как

$$H(t) = H_w + c_\phi \cdot \Delta t \cdot \tan(\varphi(t)), \quad (6)$$

где c_ϕ – оценка фазовой скорости волны; Δt – интервал времени между соседними отсчетами.

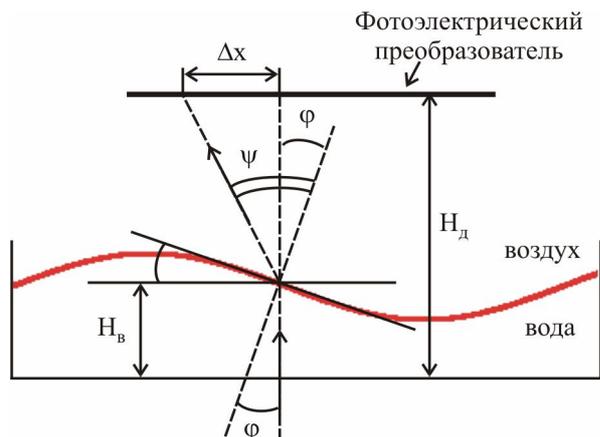


Рис. 9. Геометрия установки при проведении экспериментальных исследований

Зависимость от времени $H(t)$ пересчитывается в зависимость от координат $H(x, y)$ как

$$H(x, y) = c_{\phi} \cdot H(t). \quad (7)$$

Выполняется статистическая обработка полученных данных, в результате которой определяются корреляционные функции и законы распределения высот в продольном и поперечном направлениях.

4. Метод восстановления профиля водной поверхности

В работе [10] была предложена методика моделирования многомасштабных шероховатых поверхностей по известной двумерной корреляционной функции высот или известной пространственной частотной характеристике [12]. Поверхность представляется в виде двумерного случайного процесса с заданным законом распределения высот и заданной двумерной корреляционной функцией.

Методика восстановления профиля водной поверхности по экспериментальным данным, полученным с помощью лазерного волнографа, заключается в следующем:

- осуществляется обработка экспериментальных данных согласно методике, предложенной в п. 3;
- с помощью прямого преобразования Фурье вида

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (8)$$

где $s(t)$, $S(\omega)$ – сигналы соответственно в пространственной и частотной области, вычисляются спектры волнения в продольном и поперечном направлениях;

- в том случае, когда спектры являются многомодовыми, они разбиваются на серию из n узкополосных спектров (рис. 10, а – в);

- для каждого из узкополосных спектров вычисляются шаги дискретизации по частоте Δf_x , Δf_y и по координатам Δx , Δy таким образом, чтобы соблюдалась теорема Котельникова [13];

- пространственный спектр определяется как произведение широкополосных спектров в ортогональных направлениях;

- выполняется моделирование n поверхностей с узкополосным пространственным спектром с соответствующими шагами дискретизации по координатам методом векторной рекурсивной фильтрации [9] (рис. 10, д – ж);

- осуществляется пространственная линейная интерполяция [18] полученных поверхностей до требуемого (наименьшего) шага дискретизации;

- полученные в результате интерполяции поверхности центрируются и нормируются;

- осуществляется суммирование n поверхностей с требуемыми коэффициентами, соответствующими высотам (рис. 10, з).

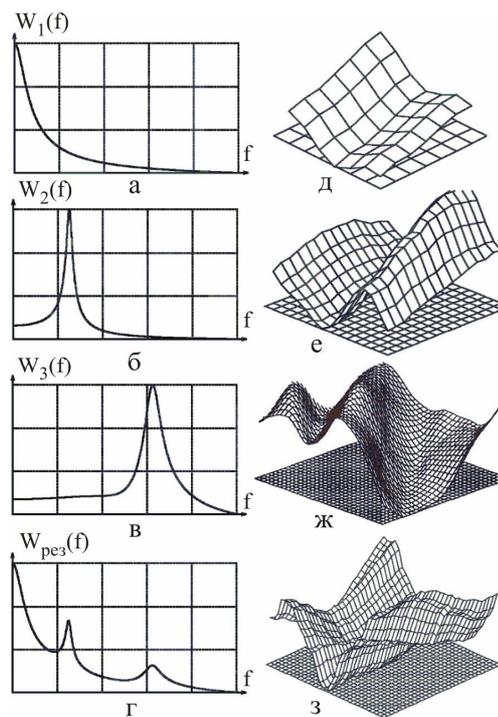


Рис. 10. Метод восстановления профиля многомасштабной шероховатой поверхности

Суммирование поверхностей обеспечивает суммирование спектров, в результате чего восстановленная шероховатая поверхность характеризуется заданным широкополосным спектром.

5. Результаты исследований

Проводились экспериментальные исследования профиля водной поверхности. Периодические ква-

зисинусоидальні волни формувались при допомозі лабораторного генератора, конструкція якого предложена в п. 1.2; профіль поверхності вимірявся лазерним волнографом (п. 1.1). Частота управляючих імпульсів складала 3,9 Гц, рівень води – 3 см, висота фотоелектричного датчика – 12 см відносно дна ємкості. Частота дискретизації складає 53 Гц, час між відліками – 19 мс, час спостереження – 39 с.

На рис. 11 представлені апроксимовані різниця і сумарна характеристики для каналів {2, 4}.

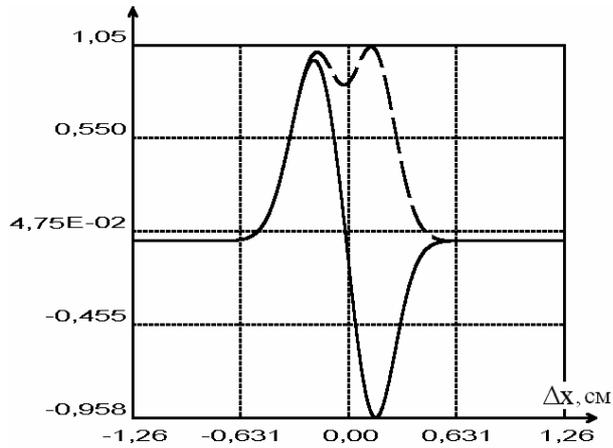


Рис. 11. Апроксимовані різниця (сплошная лінія) і сумарна (пунктир) характеристики в каналах {2,4}

Фрагмент сечення профіля поверхності в продольному напрямку (канали {2,4}), відновленого по алгоритму, описаному в п. 4, представлений на рис. 12.

В каналах {1,3} сигнал змінювався на ±0,6% відносно середнього рівня, що може розглядатися як погрешність вимірювання.

Спектр і гистограма сечення профіля поверхності в продольному напрямку представлені на рис. 13 і 14 відповідно.

Осуществлялось математическое моделювання поверхності по результатам дистанційних вимірювань її профіля згідно методики, предложеної в п. 4

Многомодовий спектр профіля поверхності (рис. 13) був розкладений на 3 складові, кожна з яких була апроксимована функцією наступного виду:

$$S_i(f) = K_i \exp\left\{-\frac{(f - m_i)^2}{\sigma_i}\right\}, \quad (9)$$

де i – номер складової, $i=1..3$; K_i , m_i і σ_i – коефіцієнти, які визначаються в ході апроксимації.

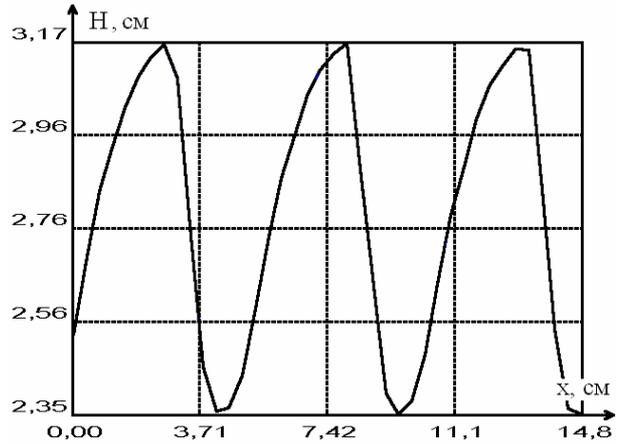


Рис. 12. Фрагмент сечення профіля поверхності в продольному напрямку (40 відліків)

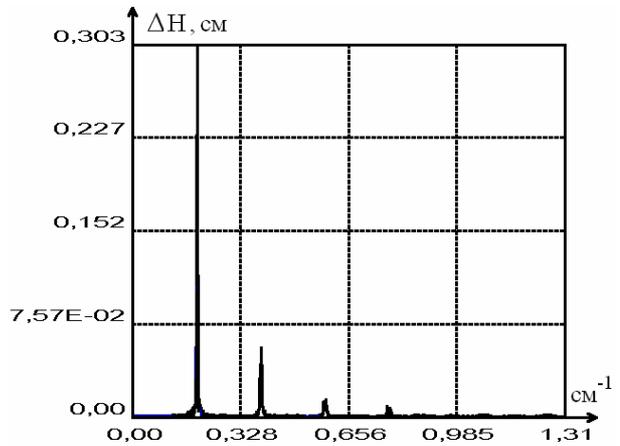


Рис. 13. Спектр профіля поверхності в продольному напрямку



Рис. 14. Гистограма профіля поверхності в продольному напрямку

Результати розкладення многомодового спектра на складові представлені на рис. 15. Частоти дискретизації для кожної з компонент склали $3,9 \text{ см}^{-1}$, $7,8 \text{ см}^{-1}$ і $11,7 \text{ см}^{-1}$ відповідно. Результуюча модель поверхності і її сечення показані на рис. 16, 17.

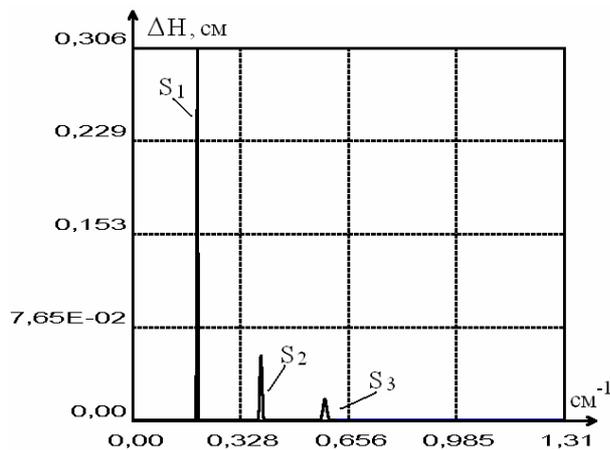


Рис. 15. Результаты разложения многомодового спектра на составляющие



Рис. 16. Модель поверхности, полученная методом векторной рекурсивной фильтрации

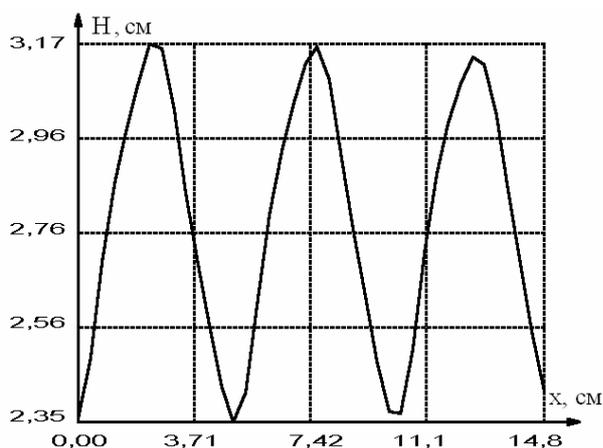


Рис. 17. Сечение модели поверхности в продольном направлении

Заключение

В данной работе исследована возможность построения математической модели поверхности по результатам дистанционных измерений ее профиля. Анализ результатов показал, что метод моделирова-

ния многомасштабных шероховатых поверхностей, в основе которого лежат алгоритмы векторной рекурсивной фильтрации, позволяет получать адекватные модели поверхности.

Разработанные методики и программное обеспечение создают предпосылки для дальнейших исследований, а именно для выявления общих закономерностей влияния свойств подстилающей поверхности на отраженный радиолокационный сигнал.

Литература

1. Красовский Г.Я. *Аэрокосмический мониторинг поверхностных вод* / Г.Я. Красовский. – Л.: ВНИИКАМ, 1992. – 231 с.
2. Яцик А.В. *Водогосподарська екологія* / А.В. Яцик. – К.: Генеза, 2004. – Т. 3, кн. 5. - 496 с.
3. Закон України „Про охорону навколишнього природного середовища” // *Відомості Верховної Ради України*. – 1991. - № 41. - Ст. 546.
4. *Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей: моногр.* / Под ред. С.Н. Конюхова, В.И. Драновского, В.Н. Цымбала. – К.: НАНУ, 2007. – 440 с.
5. Волосяк В.К. *Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации* / В.К. Волосяк, В.Ф. Кравченко; под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 704 с.
6. *Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 4. Черное море. Вып.3 Современное состояние загрязнения вод Черного моря* / Под ред. А.И. Симонова, А.И. Рябикина. – Севастополь: ЭКОСИ - Гидрофизика, 1996. - 230 с.
7. *Радиолокационные методы исследования земли* / Ю.А. Мельник, С.Г. Зубкович и др.; под ред. Ю.А. Мельника. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
8. Красюк Н.П. *Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС* / Н.П. Красюк, В.Л. Коблов, В.Н. Красюк. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
9. Борцова М.В. *Моделирование шероховатых поверхностей методом рекурсивной фильтрации* / М.В. Борцова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 5. – С. 79-85.
10. Борцова М.В. *Моделирование многомасштабных поверхностей методом векторной рекурсивной фильтрации* / М.В. Борцова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 1/58. – С. 84-88.
11. Борцова М.В. *Моделирование многомасштабных шероховатых поверхностей с произвольными углами ориентации слоев* / М.В. Борцова, А.В. Попов // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. – 2010. – № 3(44). – С. 110-115.
12. Быков В.В. *Цифровое моделирование в статистической радиотехнике* / В.В. Быков. – М.: Сов. радио, 1971. – 440 с.

13. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

14. Борцова М.В. Моделирование поляриметрических сигналов, отраженных подстилающей поверхностью, с учетом параметров радиолокационной станции / М.В. Борцова, А.В. Попов // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2009. – № 4(38). – С. 33-41.

15. Козаченко Д.Ю. Лазерный измеритель профиля водной поверхности / Д.Ю. Козаченко // Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении: тез. докл. Межд. НТК «ИКТМ' 2009».

16 – 20 ноября 2009 г. – X., 2009. – С. 178.

16. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны: пер. с англ. / А.Р. Хиппель. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 439 с.

17. Долженко Я.И. Генератор волн на водной поверхности для экспериментальных исследований в условиях лаборатории / Я.И. Долженко // Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении: тез. докл. Межд. НТК «ИКТМ' 2010». 22 – 26 ноября 2010 г. – X., 2010. – С. 174.

18. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: Практическое руководство: пер. с англ. / Т. Шуп. – М.: Мир, 1982. – 238 с.

Поступила в редакцию 5.11.2010

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, с.н.с. В.И. Луценко, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДУ ВІДНОВЛЕННЯ ПРОФІЛЮ ВОДНОЇ ПОВЕРХНІ

М.В. Борцова, Д.Ю. Козаченко, А.В. Попов, Я.І. Долженко

Для експериментальних досліджень профілю водної поверхні запропоновано конструкцію лазерного хвилеграфу, дія якого засновується на вимірюванні кута заломлення лазерного променя при проходженні границі вода-повітря. Розроблено генератор хвиль, що дозволяє формувати хвилі на поверхні води з частотою від 0,1 до 15 Гц та амплітудою до 3 см. Запропоновано методики проведення експериментальних досліджень, обробки отриманих експериментальних даних та метод відновлення профілю водної поверхні. Досліджено можливість побудови математичної моделі поверхні за результатами дистанційних вимірювань її профілю.

Ключові слова: моделювання, профіль поверхні, заломлення, лазерний волнограф, генератор хвиль, рекурсивна фільтрація.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE METHOD OF WATER SURFACE PROFILE RECONSTRUCTION

M.V. Bortsova, D.Ju. Kozachenko, A.V. Popov, Ja.I. Dolgenko

For experimental researches of water surface profile a construction of a laser wave recorder is suggested. It's principle of operation is based upon the refraction angle of the laser beam measurements when the beam goes through the water-air boundary. A laboratory generator that allows forming water waves with frequencies of 0.1 to 15 Hz and amplitudes up to 3 sm is developed. Some principles for experimental researches, principles for the received experimental data processing and a method for water surface profile reconstruction are suggested. Possibility of building a mathematical model of a surface using the results of remote measuring of it's profile is investigated.

Key words: modeling, surface profile, refraction, laser wave recorder, wave generator, recursive filtering.

Борцова Мария Викторовна – аспирант кафедри виробництва радіоелектронних систем летальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харьков, e-mail: masha_bortsova@rambler.ru.

Козаченко Дмитрий Юрьевич – магістр кафедри виробництва радіоелектронних систем летальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харьков, e-mail: kozachenko_dima@mail.ru.

Попов Анатолий Владиславович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри виробництва радіоелектронних систем летальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харьков, e-mail: a.v.popov@inbox.ru.

Долженко Ярослав Игоревич – бакалавр кафедри виробництва радіоелектронних систем летальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харьков, e-mail: 9icoh@mail.ru.