

Валентин Иванович Козинцев родился в 1945 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Д-р техн. наук, зам. директора НИИ “Радиоэлектроника и лазерная техника” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 150 научных работ в области лазерной техники.

V.I. Kozintsev (b. 1945) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. D.Sc. (Eng.), deputy director of “Radio Electronics and Laser Technology” research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 150 publications in the field of laser technology.



Борис Викторович Стрелков родился в 1947 г., окончил в 1971 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, декан факультета “Радиоэлектроника и лазерная техника” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 50 научных работ в области лазерной и измерительной техники.

B.V. Strelkov (b. 1947) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. Ph. D. (Eng.), dean of “Radio Electronics and Laser Technology” faculty of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 50 publications in the field of laser and measurement technology.

УДК 621.378

А. М. Горелов, С. Б. Каледин,
В. Н. Носов

РАЗДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА ПРИ ЛАЗЕРНОМ СКАНИРУЮЩЕМ ЗОНДИРОВАНИИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрен способ разделения информации о локальном радиусе кривизны морской поверхности в точке зондирования и о расстоянии от локатора до морской поверхности на основе измерения количества энергии в трех фиксированных по положению и одинаково ограниченных по апертуре сечениях принятого лазерного пучка.

Состояние поверхности океана отображает многообразие процессов, происходящих как в атмосфере, так и в самом океане. На поверхности океана возникает суперпозиция коротких и длинных волн. Поскольку мелкомасштабное волнение является малоэнергетическим компонентом спектра морских волн, то оно в наибольшей степени подвержено изменениям, вызванным различного рода возмущениями, происходящими по обе стороны поверхности океана. Изучение статистики параметров поверхностного волнения, особенно в коротковолновой части спектра, позволяет получить обширную информацию о процессах,

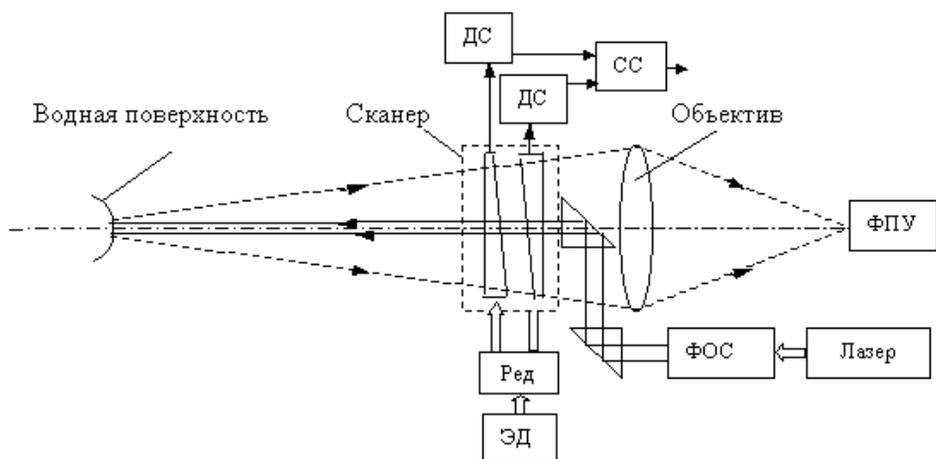


Схема лазерного локатора:

ФОС — формирующая оптическая система, ЭД — электродвигатель, Ред — редуктор, ФПУ — фотоприемное устройство, ДС — датчик синхронизации, СС — система синхронизации

протекающих в толще океана. В последнее время наблюдается большой интерес к таким исследованиям: и к теоретическому описанию [1–3], и к практическому измерению параметров поверхностного волнения [4, 5].

Проведение исследований предполагает создание аппаратуры, обладающей высокой чувствительностью и пространственным разрешением. Важным перспективным направлением в разработке методов и средств этих исследований является создание дистанционных способов зондирования морской поверхности. Не останавливаясь подробно на анализе большого числа таких методов, отметим, что оптические лазерные локаторы в наибольшей степени отвечают перечисленным требованиям.

Сущность работы лазерного локатора, предназначенного для исследования морского волнения, сводится к сканированию узким лазерным пучком водной поверхности [5]. Схема одной из разновидностей судового лазерного локатора представлена на рисунке.

Излучение лазера с помощью телескопической системы трансформируется в узкий коллимированный пучок лучей, который направляется на водную поверхность. Сканер изменяет пространственное направление этого луча по определенному закону сканирования. После отражения от водной поверхности бликовое излучение попадает во входной зрачок объектива и фокусируется им в некоторой плоскости изображения. С этой плоскостью совмещено положение фоточувстви-

тельной площадки фотоприемника. Следует отметить, что оптические оси лазерного подсвечивающего пучка и приемной системы совпадают, поэтому если в точке отражения нормаль к поверхности будет направлена вдоль оптической оси, то отраженная часть пучка попадает во входной зрачок приемной системы. Нетрудно показать, что величина отраженного бликового потока излучения, а значит, и сигнал фотоприемника зависят от радиуса кривизны водной поверхности в точке отражения. По амплитуде фотосигнала можно определить параметры поверхностного волнения.

Согласно теории оптических систем положение плоскости изображения зависит от расстояния между объектом (в данном случае — водной поверхностью) и объективом. При изменении этого расстояния изображение смещается вдоль оптической оси, т.е. не совпадает с предварительно установленным положением фотоприемника. Вследствие этого регистрируемый фотосигнал будет зависеть не только от параметров исследуемого мелкомасштабного волнения, но и от изменения расстояния, и результаты измерений могут существенно исказиться. Для повышения достоверности исследований необходимо устранить указанную зависимость сигнала от расстояния при лазерном сканирующем зондировании морской поверхности. В настоящей работе предпринята попытка определить подход к решению этой задачи.

Лазерный пучок характеризуется двумя важными информативными параметрами — конфокальным параметром и положением перетяжки. При прохождении пучка через элементы оптической системы эти параметры изменяются. Такие изменения рассчитываются с помощью известных теоретических соотношений [6]. Таким образом, если известны значения конфокального параметра и положение перетяжки в двух различных точках оптической системы, через которую проходит лазерный пучок, то можно определить недостающие параметры этой оптической системы. В данном случае речь идет о расстоянии между морской поверхностью и объективом приемной системы локатора.

Структура поля лазерного излучения для резонатора с цилиндрической симметрией описывается формулой [6]

$$M_{\rho l}(r_w, \phi, \zeta) = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta^2}} M_{\rho l}^0 \left(\frac{\sqrt{2} r_w}{\sqrt{1 + \zeta^2}} \right)^{2l} \times \\ \times \left(L_p^1 \left(\frac{2r_w^2}{1 + \zeta^2} \right) \right)^2 \exp \left(-\frac{2r_w^2}{1 + \zeta^2} \right) \cos(l\phi)^2,$$

где $M_{\rho l}(r_w, \phi, \zeta)$ — нормированное распределение интенсивности поля моды; $r_w = \frac{r}{1 + \zeta^2}$ — нормированная радиальная координата;

$\zeta = \frac{2z}{R_e}$ — нормированная продольная координата; $M_{\rho l}^0$ — начальная амплитуда моды; $L_p^1\left(\frac{2r_w^2}{1+\zeta^2}\right)$ — полином Лагерра; ρ — радиальный индекс моды; l — угловой индекс моды; φ — угловая координата. Переходя в этом соотношении к ненормированным координатам, получаем

$$M_{\rho l}(r, \phi, z) = \frac{\sqrt{R_e}}{\sqrt{R_e^2 + 4z^2}} M_{\rho l}^0 \times \\ \times \left(2r \sqrt{\frac{\pi R_e}{\lambda(R_e^2 + 4z^2)}}\right)^{2l} \left(L_p^1\left(\frac{4r^2 \pi R_e}{\lambda(R_e^2 + 4z^2)}\right)\right)^2 \times \\ \times \exp\left(-\frac{4r^2 \pi R_e}{\lambda(R_e^2 + 4z^2)}\right) \cos(l\phi)^2. \quad (1)$$

Радиальное распределение энергии можно вычислить по формуле

$$E(r_0, z) = \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} M(r, \phi, z) d\phi dr_w. \quad (2)$$

Соотношения (1) и (2) для основной моды резонатора имеют вид

$$M_{00}(r, \phi, z) = M_0 \frac{\sqrt{R_e}}{\sqrt{R_e^2 + 4z^2}} \exp\left(-\frac{4r^2 \pi R_e}{\lambda(R_e^2 + 4z^2)}\right), \quad (3)$$

$$E_0(r_0, R_e, z) = \frac{\pi M_0 \sqrt{\lambda}}{2} \operatorname{erf}\left(2r_0 \sqrt{\frac{\pi R_e}{\lambda(R_e^2 + 4z^2)}}\right). \quad (4)$$

Если ввести относительную (нормированную на размер перетяжки) радиальную координату для подсчета энергии

$$r_{0w} = r_0 \left(\sqrt{\frac{\lambda R_e}{2\pi}}\right)^{-1} \quad (5)$$

и подставить ее в соотношение (4), то получим выражение для радиального распределения энергии:

$$E_0(r_{0w}, R_e, z) = \frac{\pi M_0 \sqrt{\lambda}}{2} \operatorname{erf}\left(r_{0w} \sqrt{\frac{2R_e^2}{R_e^2 + 4z^2}}\right). \quad (6)$$

Выражение (6) необходимо для составления системы уравнений, определяющих параметры лазерного пучка. Входящая в это выражение функция ошибок $\operatorname{erf}(x)$, к сожалению, осложняет его применение.

При невысоких требованиях к точности определения параметров можно применить приближенное описание функции ошибок на основе ее степенного представления. Анализируя график функции ошибок, можно отметить ее практическую линейность на интервале $0 < x < 1$, которая позволяет разложить функцию в ряд Тейлора и ограничиться первым членом разложения:

$$\operatorname{erf}(x) \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}}x. \quad (7)$$

Как показывает анализ, относительная ошибка такого приближения составляет не более 20 %, что можно считать допустимым при проведении практических измерений.

Согласно равенству (7) выражение (6) принимает вид

$$E_0(r_{0w}, R_e, z) \approx M_0 r_{0w} R_e \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{R_e^2 + 4z^2}}. \quad (8)$$

Расположим последовательно по ходу лазерного пучка три диафрагмы одинакового размера на расстояниях z_1, z_2, z_3 от объектива:

$$z_1 = z, \quad z_2 = z + \Delta_{z1}, \quad z_3 = z + \Delta_{z1} + \Delta_{z2}, \quad (9)$$

где Δ_{z1} и Δ_{z2} — известные расстояния соответственно между первой и второй диафрагмами и между второй и третьей диафрагмами.

Из равенств (7) и (8) получаем

$$E_0(r_{0w}, R_e, z_1) \approx M_0 r_{0w} R_e \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{R_e^2 + 4z^2}}, \quad (10)$$

$$E_0(r_{0w}, R_e, z_2) \approx M_0 r_{0w} R_e \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{R_e^2 + 4(z + \Delta_{z1})^2}}, \quad (11)$$

$$E_0(r_{0w}, R_e, z_3) \approx M_0 r_{0w} R_e \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{R_e^2 + 4(z + \Delta_{z1} + \Delta_{z2})^2}}. \quad (12)$$

Сформируем два относительных отсчета:

$$f_1 = \frac{E_0(r_{0w}, R_e, z_2)}{E_0(r_{0w}, R_e, z_1)}, \quad (13)$$

$$f_2 = \frac{E_0(r_{0w}, R_e, z_3)}{E_0(r_{0w}, R_e, z_1)}. \quad (14)$$

Из соотношений (10)–(14) получаем систему уравнений

$$\frac{R_e^2 + 4z^2}{R_e^2 + 4(z + \Delta_{z1})^2} = f_1^2, \quad (15)$$

$$\frac{R_e^2 + 4z^2}{R_e^2 + 4(z + \Delta_{z1} + \Delta_{z2})^2} = f_2^2. \quad (16)$$

Решив эту систему уравнений, получаем следующие выражения:

$$z = \frac{1}{\sqrt{2(f_1^2 - f_2^2)}} \sqrt{A + \sqrt{B}}, \quad (17)$$

$$A = 2(f_2^2 - f_1^2) \Delta_{z1} + 2f_2^2(1 - f_1^2) \Delta_{z2} + f_1^2 - f_2^2,$$

$$B = (f_2^2 - f_1^2)^2(1 - 4\Delta_{z1}) + 4f_2^2(1 - f_1^2) \Delta_{z2} (f_1^2(f_1^2 - 1) \Delta_{z2} + f_2^2 - f_1^2),$$

$$R_e = \frac{\sqrt{2}}{f_1^2 - f_2^2} \sqrt{C + D}, \quad (18)$$

$$C = 2(f_2^2 - f_1^2) \Delta_{z1} + 2f_1^2 f_2^2 (f_2^2 - 2f_1^2 f_2^2 + f_1^2) \Delta_{z2}^2 - 2f_2^2 ((2f_1^2 - 1)(f_2^2 - f_1^2) - f_2^2) \Delta_{z2} - f_2^4 - f_1^4,$$

$$D = (2f_2^2 (f_1^2 \Delta_{z2} + 1) - f_1^2) \times$$

$$\times \sqrt{(f_2^2 - f_1^2)(1 - 4\Delta_{z1}) + 4f_2^2 (f_1^2 - 1)(f_1^2 (f_1^2 - 1) \Delta_{z2} + f_2^2 - f_1^2) \Delta_{z2}}.$$

Для упрощения решений (17) и (18) положим, что диафрагмы находятся на одинаковом расстоянии друг от друга, т.е.

$$\Delta_{z1} = \Delta_{z2} = \Delta_z; \quad (19)$$

тогда расчетные соотношения получим в виде

$$z = \frac{1}{\sqrt{2(f_1^2 - f_2^2)}} \sqrt{A + \sqrt{B}}, \quad (20)$$

$$A = -2(f_1^2 + f_1^2 f_2^2 - 2f_2^2) \Delta_z + f_1^2 - f_2^2,$$

$$B = 4f_1^2 f_2^2 (f_1^2 - 1)(f_2^2 - 1) \Delta_z^2 +$$

$$+ 4(f_2^2 - f_1^2)(f_1^2 + f_1^2 f_2^2 - 2f_2^2) \Delta_z + (f_2^2 - f_1^2)^2,$$

$$R_e = \frac{\sqrt{2}}{f_1^2 - f_2^2} \sqrt{C + D}, \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
C &= 2f_1^2 f_2^2 (f_2^2 - 2f_1^2 f_2^2 + f_1^2) \Delta_z^2 - \\
&\quad - 2(f_2^2 - f_1^2) (f_1^2 + f_1^2 f_2^2 - 2f_2^2) \Delta_z - (f_2^2 - f_1^2)^2, \\
D &= (2f_1^2 f_2^2 \Delta_z - f_1^2 + f_2^2) \left(4f_1^2 f_2^2 (f_2^2 - 1) (f_1^2 - 1) \Delta_z^2 + \right. \\
&\quad \left. + 4(f_2^2 - f_1^2) (f_1^2 + f_1^2 f_2^2 - 2f_2^2) \Delta_z + (f_2^2 - f_1^2)^2 \right)^{1/2}.
\end{aligned}$$

Таким образом, предлагаемый метод позволяет по трем измерениям определить параметры лазерного пучка R_e и z в пространстве предметов, т.е. за объективом приемной системы. Обозначив найденные параметры через R'_e и z' , как принято в оптике, их можно вычислить по известным соотношениям:

$$R_e = \frac{R'_e}{(1 + z'/f'_{об})^2 + (R'_e/2f'_{об})^2}, \quad (22)$$

$$1 - \frac{z}{f'_{об}} = \frac{1 + z'/f'_{об}}{(1 + z'/f'_{об})^2 + (R'_e/2f'_{об})^2}. \quad (23)$$

Зная параметры лазера и формирующей системы, можно рассчитать параметры $R_{ек}$ и $z_{к}$ коллимированного лазерного пучка перед поверхностью воды.

Параметры пучка до отражения на сферической поверхности волны ($R_{ек}$ и $z_{к}$) и после него (R_e и z) связаны соотношениями

$$R_{ек} = \frac{R_e}{(1 + z_e/f'_e)^2 + (R_e/2f'_e)^2}, \quad (24)$$

$$1 - \frac{z_{к}}{f'_B} = \frac{1 + z_e/f'_e}{(1 + z_e/f'_e)^2 + (R_e/2f'_e)^2}, \quad (25)$$

$$z_e = z - L_{д}, \quad (26)$$

где f'_B — фокусное расстояние, определяемое кривизной поверхности волны; $L_{д}$ — расстояние между водной поверхностью и приемной системой.

Уравнение (26) определяет положение перетяжки относительно поверхности волны. Решив систему уравнений (24)–(26), получим расчетные соотношения для определения неизвестных параметров f'_B и $L_{д}$:

$$L_{д1} = z + z_{к} \frac{R_e}{R_{ек}} + \frac{1}{2} \frac{R_{к}}{R_{ек}} \frac{(2z_{к}R_e + A_1)}{R_e - R_{ек}} (1 - R_e), \quad (27)$$

$$f'_{e1} = \frac{1}{2} \frac{2z_{к}R_e + A_1}{R_e - R_{ек}}, \quad (28)$$

$$L_{д2} = z + z_{к} \frac{R_e}{R_{ек}} + \frac{1}{2} \frac{R_{к}}{R_{ек}} \frac{(2z_{к}R_e - A_1)}{R_e - R_{ек}} (1 - R_e), \quad (29)$$

$$f'_{e2} = \frac{1}{2} \frac{2z_k R_e - A_1}{R_e - R_{ek}}, \quad (30)$$

$$A_1 = \sqrt{R_{ek}^3 R_e + 4z_k^2 R_e R_{ek} - R_e^2 R_{ek}^2}. \quad (31)$$

Фокусное расстояние зеркальной поверхности воды составляет половину радиуса $R_{пов}$:

$$R_{пов} = 2f'_B. \quad (32)$$

Поскольку водная поверхность имеет вогнутую или выпуклую форму, то, соответственно, получаем два решения как для расстояния L_d , так и для фокусного расстояния f'_B .

Таким образом, выражения (27)–(32) позволяют определить радиус кривизны водной поверхности в точке отражения и одновременно регистрировать расстояние от приемной системы до поверхности.

Для практической реализации данного метода необходимо использовать трехканальную схему регистрации и обработки сигналов фотоприемников. Обработка фотосигналов проводится в вычислительном устройстве по специальной программе, реализующей алгоритм, построенный на основе зависимостей (10)–(32). Наличие информации о расстоянии от объектива до водной поверхности позволяет также регистрировать характеристики в длинноволновой части спектра морских волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лонге - Хиггинс М. С. Статистический анализ случайной движущейся поверхности. Ветровые волны. – М.: Ин. лит., 1962. – С. 125–218.
2. Шифрин К. С., Гардашов Р. Г. Модельные расчеты отражения света от морской поверхности // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. – Т. 21. – № 2. – С. 162–169.
3. Дубовик А. Н. Статистика оптического излучения при обратном отражении от зеркальных точек морской поверхности // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. – 1997. – Т. 33. – № 1. – С. 137–144.
4. Ву, Хаймбах, Хсу. Сканирующий прибор для исследования ветровой ряби на поверхности моря // Приборы для научных исследований. – 1981. – № 8. – С. 120–126.
5. Носов В. Н., Пашин С. Ю., Зосимов В. В. et al. The use of laser scanning locators for the study of statistical characteristics of sea waves // Laser physics. – 1993. – V. 3. – № 1. – P. 209–213.
6. Климов Ю. М. Прикладная лазерная оптика. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.

Статья поступила в редакцию 21.10.2002



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 для оптико-электронной обработки информации.

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



Сергей Борисович Каледин родился в 1956 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области оптико-электронных приборов.

S.B. Kaledin (b. 1956). Ph.D. (Eng.), ass. professor of “Laser and Optical-and-Electronic Systems” of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 publications in the field of optical-and-electronic devices.

Виктор Николаевич Носов родился в 1947 г. 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). D.Sc. (Eng.), leading researcher of the Institute for Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences. Author of over 80 publications in the field of hydrophysics and laser location.