

УДК 535.36+551.463.5

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ «ИДЕАЛЬНОЙ» СИСТЕМЫ ВИДЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЗВОЛНОВАННУЮ ВОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

*А. Г. Лучинин **

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Предложены новые принципы построения системы видения через взволнованную водную поверхность, позволяющие снизить негативное влияние волнения и многократного рассеяния в воде на пространственное разрешение. Рассмотрена модель системы, в которой изображение подводных объектов формируется за счёт углового сканирования пучком подсветки. Искажения изображения в такой системе обусловлены в основном случайными изменениями угла преломления лазерного пучка на поверхности и могут быть устранены, если известно истинное направление входа пучка в воду. Информацию об угле преломления пучка предлагается извлекать из углового распределения яркости обратно рассеянного подповерхностным слоем воды сигнала. Влияние многократного рассеяния в воде предлагается уменьшить с помощью модуляции пучка подсветки сложным высокочастотным сигналом и согласованной обработки данных в приёмной системе. Показано, что сочетание предлагаемых методов формирования изображения позволяет существенно улучшить разрешение системы видения, размещаемой на воздушном носителе.

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме видимости подводных объектов, в том числе наблюдаемых из атмосферы через взволнованную поверхность, посвящено большое число оригинальных работ и несколько монографий [1–7]. Тем не менее проведённые исследования этой проблемы нельзя считать исчерпывающе полными. По-прежнему заманчивой и многообещающей остаётся возможность снижения негативного влияния случайного преломления света на поверхности раздела вода–воздух и многократного рассеяния в воде на качество формируемого изображения. Отметим в связи с этим работы [8–14], в которых исследуются различные алгоритмы компенсации искажений, вносимых в изображение подводных объектов взволнованной поверхностью. С другой стороны, в работах [15–19] была высказана идея построения системы наблюдения, в которой для подсветки и формирования изображения используется лазерный пучок, модулированный сложным высокочастотным сигналом. Предполагаемым преимуществом систем наблюдения такого типа является их высокое разрешение по всем трём пространственным координатам. Оно достигается за счёт снижения влияния многократного рассеяния света на пространственно-временную структуру полезного сигнала в диапазоне частот модуляции.

В настоящей работе предпринята попытка синтеза идей, связанных с применением сложно модулированных пучков подсветки в системах видения, и идей, направленных на компенсацию влияния поверхностного волнения на характеристики формируемого изображения. При этом мы будем опираться на модели световых полей и сигналов, содержащиеся в работах [14, 15].

1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Для полноты и связности изложения приведём здесь, следуя работе [14], основную идею компенсации искажений изображения, вызванных поверхностным волнением. Будем считать, что изображение

* luch@appl.sci-nnov.ru

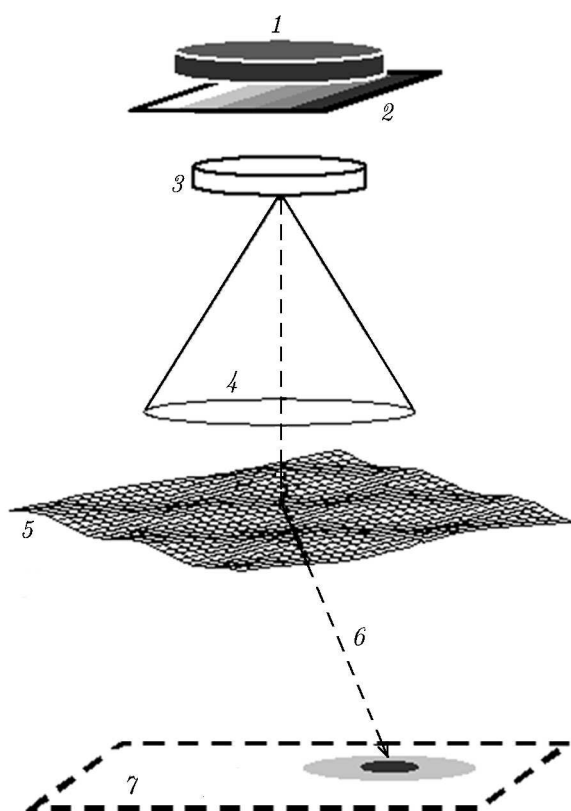


Рис. 1. Схема наблюдения: 1 — фотодетектор, 2 — маска, 3 — объектив, 4 — поле зрения, 5 — поверхность, 6 — лазерный пучок, 7 — слой воды

пользовать дополнительные фотоприёмники с анизотропными диаграммами направленности, которые реагируют на изменения угла прихода сигнала обратного объёмного рассеяния. Указанным свойством обладают, например, приёмники с линейно-неоднородной по полю зрения чувствительностью (их можно создавать путём наложения маски с линейно-неоднородной прозрачностью на катод фотоэлектронного умножителя). При отклонении обратно рассеянного пучка в сторону увеличения чувствительности фотодетектора сигнал будет возрастать, а при его отклонении в противоположном направлении — уменьшаться. Для регистрации отклонений пучка в двух ортогональных направлениях необходимо располагать по крайней мере двумя дополнительными фотоприёмниками, чувствительность которых изменяется в соответствующих направлениях. Рисунок 1, заимствованный из работы [14], поясняет принцип определения угла преломления зондирующего пучка при его вхождении в воду.

Разумеется, можно было бы ограничиться одним многоэлементным фотоприёмником и соответствующей цифровой обработкой получаемого изображения. Такая обработка должна предусматривать определение положения центра тяжести пятна яркости, формируемого сигналом обратного рассеяния. При этом фотоприёмник должен иметь высокое разрешение во времени для выделения сигнала, обратно рассеянного достаточно тонким слоем воды. Это в равной степени относится и к системам с подсветкой короткими импульсами, и к системам, в которых разрешение по времени (дальности) достигается за счёт сжатия сложно модулированного сигнала. Как показано в работе [14], оценка статистически среднего локального угла наклона поверхности в

дна или подводного объекта формируется путём сканирования лазерным пучком с определением зависимости энергии отражённого сигнала от направления зондирования. Падающий на поверхность пучок считаем узким по сравнению с длинами ветровых волн, которые вносят основной вклад в дисперсию уклонов поверхности. При выполнении этого условия искажения изображения будут обусловлены в основном случайными изменениями угла преломления лазерного пучка на поверхности и могут быть устранены, если будет известно истинное направление входа пучка в воду. Информацию об угле преломления лазерного пучка предлагается извлекать из углового распределения яркости обратно рассеянного водой сигнала согласно работе [14].

Изменение направления распространения пучка приводит к смещению светового пятна как на объекте наблюдения, так и на водном слое (между объектом и поверхностью), от которого приходит отражённый сигнал в заданный момент времени. Объектив приёмника формирует «мгновенное» изображение этого пятна в фокальной плоскости, однако при использовании одноэлементного фотодетектора информация о его положении и структуре утрачивается. Поэтому для регистрации смещений пучка предлагается ис-

точке вхождения зондирующего пучка в воду определяется соотношением ¹

$$\bar{\eta}_{0x} = \frac{\bar{P}_{2x}}{\bar{P}_1} \frac{H + z/m}{\alpha q z}, \quad \bar{\eta}_{0y} = \frac{\bar{P}_{2y}}{\bar{P}_1} \frac{H + z/m}{\alpha q z}, \quad (1)$$

где $\bar{\eta}_{0x}$ и $\bar{\eta}_{0y}$ — средние ортогональные проекции локальной нормали к поверхности на горизонтальную плоскость xy , $\bar{P}_1$ — средняя мощность сигнала обратного рассеяния, поступающего на изотропный приёмник от слоя воды ², расположенного на глубине z , $\bar{P}_{2x}$ и $\bar{P}_{2y}$ — соответствующие средние мощности сигнала обратного рассеяния, регистрируемые приёмниками с «клиновыми» диаграммами направленности, α — градиент прозрачности маски, H — высота расположения лидара над поверхностью, m — коэффициент преломления воды, коэффициент $q = (m - 1)/m$. Таким образом, определив уклон поверхности в точке вхождения луча в воду и, тем самым, угол его преломления, можно найти (проконтролировать) смещение луча на объекте наблюдения и внести соответствующую коррекцию в формируемое изображение. Эта процедура может быть использована и при подсветке короткими импульсами, и при работе системы наблюдения со сложно модулированным пучком подсветки.

После того, как получена информация об угле вхождения пучка в воду и устранены привносимые волнением искажения при формировании изображения, полученное изображение дополнительно фильтруется путём его свёртки с априорно известной функцией рассеяния точки слоя воды. Таким образом, изображение объекта, наблюдаемого через поверхность, может быть сформировано следующим набором операций. Узкий пучок подсветки, сканирующий поле зрения, модулируется по мощности сложным высокочастотным сигналом. В приёмнике детектируется высокочастотный сигнал модуляции, который свёртывается с эталоном. На этом этапе осуществляется сжатие сигнала, которое определяет разрешение по дальности. Далее выделяется огибающая сжатого сигнала. По положению центра тяжести огибающей этого сигнала, отражённого от выделенного слоя воды, определяется угол преломления пучка и его истинное положение на объекте наблюдения. С учётом этой информации формируется изображение, минимально искажённое волнением. Именно это изображение как функция угла сканирования сворачивается с априорно известной функцией рассеяния точки слоя воды, после чего оно поступает в устройство визуализации изображения.

Проблема определения функции рассеяния точки слоя воды или/и оптической передаточной функции толщи воды между поверхностью и объектом заслуживает отдельного обсуждения. Ей, в частности, посвящена работа [20]. С другой стороны, как показано в публикациях [18, 19], характеристики результирующего изображения слабо чувствительны к точности «эталонной» функции рассеяния точки слоя воды, и поэтому в качестве такого эталона может быть использована функция рассеяния точки слоя воды, рассчитанная на основе грубых данных об оптических свойствах воды.

2. ОШИБКИ В ОПРЕДЕЛЕНИИ УГЛА ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Определение углов, выполненное описанным выше способом, заведомо имеет вероятностный характер и, соответственно, нуждается в оценке статистических ошибок. Возможны три типа таких ошибок. Первый, обсуждавшийся в том числе в работе [14], связан с флуктуациями мощности сигналов обратного рассеяния во всех фотоприёмниках, которые и приводят к появлению

¹ Здесь и далее черта над соответствующими величинами имеет смысл усреднения по ансамблю реализаций взволнованной поверхности.

² Толщина этого слоя определяется продольным разрешением (т.е. разрешением по времени) и должна быть меньше расстояния z между ним и поверхностью.

таких ошибок. Относительная дисперсия флуктуаций угла $\overline{(\delta\eta_{0x})^2} = \overline{(\Delta\eta_{0x})^2}/(\bar{\eta}_{0x})^2$ в терминах мощности сигнала обратного рассеяния, поступающего в фотоприёмники, определяется уравнением

$$\overline{(\Delta\eta_{0x})^2} = \left[\frac{(\overline{\Delta\tilde{P}_{2x}})^2}{\bar{P}_2^2} + \frac{(\overline{\Delta P_1})^2}{\bar{P}_1^2} - \frac{2\overline{\Delta\tilde{P}_{2x}}\overline{\Delta P_1}}{\bar{P}_1\bar{P}_2} \right], \quad (2)$$

где $\Delta\tilde{P}_{2x}$, ΔP_1 — флуктуационные составляющие сигналов в фотоприёмниках.

В работе [14] получено соотношение, связывающее нормированную дисперсию величин η_{0x} и η_{0y} с характеристиками воды и поверхности в предположении, что подсветка осуществляется бесконечно узким мононаправленным пучком. Его обобщение на случай аксиально-симметричного пучка с конечной шириной имеет вид

$$\overline{(\delta\eta_{0x})^2} = \frac{1}{2} \iint G_\xi(\gamma\mathbf{k}) \left[-|k| (k_x^2 + k^2) \frac{\partial(\tilde{F}^2\tilde{\Phi}^4)}{\partial k} - k^2 k_x^2 \left\{ \frac{\partial^2(\tilde{F}^2\tilde{\Phi}^4)}{\partial k^2} - 4 \left[\frac{\partial(\tilde{F}\tilde{\Phi}^2)}{\partial k} \right]^2 \right\} \right] d^2k, \quad (3)$$

где $G_\xi(\gamma\mathbf{k})$ — пространственный спектр возвышений ξ взволнованной поверхности, $\gamma = 1 + z/(mH)$, $\tilde{F}_s[k, k(H+z/m)] = F_s[k, k(H+z/m)]/F_s(0, 0)$ — нормированный спектр пространственно-углового распределения излучения зондирующего пучка, $\tilde{\Phi} = \Phi(k, z)/\Phi(0, z)$ — оптическая передаточная функция слоя воды с толщиной z , $\Phi(k, z)$ — пространственный спектр освещённости в поперечном сечении пучка. Для изотропного волнения формула (3) упрощается:

$$\overline{(\delta\eta_{0x})^2} = \overline{(\delta\eta_{0y})^2} = \overline{(\delta\eta_0)^2} = -\frac{1}{4} \int_0^\infty G_\xi(\gamma k) \left[3|k|^3 \frac{\partial(\tilde{F}^2\tilde{\Phi}^4)}{\partial k} + k^4 \left\{ \frac{\partial^2(\tilde{F}^2\tilde{\Phi}^4)}{\partial k^2} - 4 \left[\frac{\partial(\tilde{F}\tilde{\Phi}^2)}{\partial k} \right]^2 \right\} \right] k dk. \quad (4)$$

Второй тип ошибок вызван случайным характером возвышений поверхности, приводящих к флуктуациям времени прихода сигнала обратного рассеяния с заданного горизонта по глубине и, соответственно, к ошибке в определении его истинной глубины. Эта ошибка приводит и к ошибке в пересчёте угла отклонения лучей и, соответственно, в определении положения пучка подсветки на объекте наблюдения (в предметной плоскости). Оценка ошибки этого типа даётся простой формулой

$$\overline{(\delta\eta_{0z})^2} = \sigma_\xi^2/z^2, \quad (5)$$

где σ_ξ^2 — дисперсия возвышений поверхности.

Наконец, третий тип ошибок обусловлен аппаратными (дробовыми) шумами и зависит от энергетического потенциала системы, геометрии наблюдения и оптических свойств воды. Дробовые шумы приводят к ошибке в определении угла, описываемой уравнением

$$\langle \eta_{0\text{др}}^2 \rangle = \frac{3\langle (\Delta P_1)^2 \rangle}{\langle \bar{P}_1 \rangle^2} = \frac{3\langle (\Delta i_1)^2 \rangle}{\langle \bar{i}_1 \rangle^2}, \quad (6)$$

где $i_1 = sP_1$ — ток фотодетектора, s — его чувствительность. Угловые скобки означают усреднение по времени. Множитель 3 соответствует числу используемых фотоприёмников. Уровень дробовых шумов, как известно, определяется формулой Шоттки

$$\langle (\Delta i_1)^2 \rangle = 2e\Delta f(1+B)\langle i_1 \rangle, \quad (7)$$

где $e > 0$ — заряд электрона, Δf — ширина полосы, в которой обрабатывается сигнал, B — коэффициент, учитывающий уровень шумов, приносимый последующими каскадами усиления (в случае фотоумножителя обычно $B = 2$).

Статистически средняя мощность эхо-сигнала, отражённого от слоя воды, расположенного на глубине z , в малоугловом приближении описывается соотношением

$$\bar{P}_1 = \frac{P_0 \Sigma T^2 R_b}{(mH + z)^2} [\Phi(0, z)]^2, \quad (8)$$

где $R_b = b_b \Delta z / (4\pi)$ — коэффициент отражения от слоя воды с толщиной Δz , b_b — коэффициент обратного рассеяния, P_0 — мощность излучателя, Σ — площадь приёмной апертуры, T — коэффициент пропускания границы. Функцию $\Phi(0, z)$ можно назвать коэффициентом передачи слоя воды с толщиной z . В дальнейшем нижним индексом ω или $\omega = 0$ обозначим функции, относящиеся к высокочастотной или постоянной составляющим светового поля.

Здесь следует обратить внимание на одну особенность, которую необходимо учитывать при оценке вклада дробовых шумов в суммарную ошибку при нахождении искомого угла преломления. При использовании модулированных сложным высокочастотным сигналом пучков подсветки уровень дробовых шумов определяется «постоянной» составляющей сигнала, а уровень «полезного» сигнала и уровень мультипликативных шумов, обусловленных волнением, — его составляющей в диапазоне частот модуляции. При этом ширина полосы частот Δf , в которой обрабатывается сигнал, равна полосе модуляции сложного сигнала, определяющей разрешение системы по глубине. Соответственно, толщина слоя воды Δz , от которого формируется сигнал обратного рассеяния, связана с длительностью сжатого после обработки сигнала и его частотной полосой соотношением

$$\Delta z = \frac{c \Delta t}{2m} = \frac{c}{2m \Delta f}, \quad (9)$$

где c — скорость света в воде.

Важно также учесть, что мощность полезного сигнала после согласованной обработки (свёртки с эталоном излучаемого сигнала) увеличивается пропорционально квадратному корню из базы модулирующего сигнала, т. е. пропорционально $\sqrt{\Delta f \Delta t_0}$, где Δt_0 — длительность излучаемого импульса. Поскольку для повышения энергетического потенциала разумно максимально увеличить длительность, не превышая при этом время распространения до отражающего объекта, то можно допустить, что выполняется равенство

$$\Delta f \Delta t_0 = \frac{H + z/m}{\Delta z}. \quad (10)$$

С учётом этих соображений уравнение (6) может быть переформулировано следующим образом:

$$\langle \eta_{0\text{др}}^2 \rangle = \frac{3ec(1+B)\Delta z [\Phi_{\omega=0}(0, z)]^2}{sM^2 P_0 \Sigma b_b [\Phi_{\omega}(0, z)]^4}. \quad (11)$$

В этом уравнении коэффициент M имеет смысл глубины модуляции излучения. Функция $\Phi_{\omega}(0, z)$, как следует из автомодельного решения [21] уравнения переноса излучения в малоугловом приближении, имеет вид

$$\Phi_{\omega}(0, z) = \exp(-\kappa_1 z) / \text{ch}(\nu), \quad (12)$$

где $\nu = \mu^{-1} \sqrt{\sigma_1 (\kappa_1 + i\omega/c)}$, $\sigma_1 = \sigma(1 - \varphi_{45})$ и $\kappa_1 = \kappa + \sigma\varphi_{45}$ — «малоугловые» показатели рассеяния и поглощения, φ_{45} — доля света, рассеянного в диапазон углов $45^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$, σ и κ — показатели рассеяния и истинного поглощения воды, μ — параметр индикатрисы рассеяния, которая аппроксимируется экспоненциальной функцией

$$x(\gamma) = \frac{2\mu}{\gamma} \exp(-\mu\gamma). \quad (13)$$

Формула (11) справедлива в предположении, что полоса модулирующего сигнала $\Delta\omega = 2\pi \Delta f$ много меньше центральной частоты модуляции ω_0 .

Если пренебречь корреляцией между возвышениями и уклонами поверхности, то суммарный уровень относительных флуктуаций при определении угла преломления определяется формулой

$$\langle \eta_{\Sigma}^2 \rangle = \langle \eta_{0\text{др}}^2 \rangle + \overline{(\delta\eta_{0z})^2} + \overline{(\delta\eta_0)^2}. \quad (14)$$

Таким образом, располагая сведениями об энергетических характеристиках системы наблюдения, спектре поверхностного волнения и оптической передаточной функции толщи воды, можно оценить ошибку в определении угла преломления зондирующего пучка при его вхождении в воду. Тем самым можно найти и минимальный уровень искажений, которые вносятся волнением в формируемое изображение.

3. ОПТИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ СЛОЯ ВОДЫ

Как следует из формулы (4), чем меньше абсолютные значения производных функций $\tilde{F}_s$ и $\tilde{\Phi}$ по переменной k на глубине, для которой проводятся референтные измерения сигнала обратного рассеяния, тем точнее определяется положение зондирующего пучка и тем меньше влияние волнения на характеристики получаемого изображения. С другой стороны, функция $\tilde{\Phi}(k, z_b)$ определяет влияние слоя воды на качество изображения. Поэтому многократное рассеяние света в воде, влияющее на вид этой функции, определяет не только потерю контраста в воде, но и возможность минимизировать влияние поверхности. С этой точки зрения применение модулированных высокой частотой пучков подсветки с согласованной по этой частоте фильтрацией сигналов в приёмном тракте представляется одним из возможных путей решения проблемы потери контраста за счёт преломления на поверхности и многократного рассеяния света в воде. Оптическая передаточная функция слоя воды для спектральной (по частоте модуляции) составляющей сигнала, как следует из автомодельного решения [21] уравнения переноса излучения в малоугловом приближении, имеет вид

$$\tilde{\Phi}_{\omega}(k, z_b) = \exp[-S_{\omega}(z_b)k^2], \quad (15)$$

$$S_{\omega}(z_b) = \frac{\nu z_b - \text{th}(\nu z_b)}{2\kappa_1\nu}. \quad (16)$$

Напомним, что зависимость этих функций от частоты ω определяется соотношением $\nu = \mu^{-1} \sqrt{\sigma_1(\kappa_1 + i\omega/c)}$. Вследствие этого зависимость реальной части функции $\tilde{\Phi}_{\omega}(k, z_b)$ от пространственной частоты k имеет ярко выраженный осциллирующий характер, что приводит к фазовым искажениям в формируемом изображении согласно работе [19]. С другой стороны, применение сложных сигналов для модуляции пучка подсветки позволяет получить хорошее разрешение в продольном направлении согласно результатам [15] (в нашем случае по вертикали) и тем самым делает возможным применить описанный выше метод для коррекции изображения, искажённого волнением. Однако для описания оптической передаточной функции слоя воды при применении сложных сигналов необходимо уточнение, учитывающее дисперсионные свойства воды по отношению к волнам модуляции, т. е. волнам фотонной плотности. Как показано в работе [19], уточнённая оптическая передаточная функция слоя воды для сложного модулирующего сигнала с полосой модуляции $\Delta\omega$ около центральной частоты ω_0 имеет вид

$$\tilde{\Phi}_{\omega_0}(z_b, k) = \exp \left\{ -k^2 \left[S_{\omega_0}(z_b) - \frac{k^2 [S'_{\omega_0}(z_b)]^2 (\Delta\omega)^2}{1 + k^2 S''_{\omega_0}(z_b) (\Delta\omega)^2} \right] \right\} / \sqrt{1 + k^2 S''_{\omega_0}(z_b) (\Delta\omega)^2}, \quad (17)$$

где $S'_{\omega_0}(z_b)$ и $S''_{\omega_0}(z_b)$ — производные функции $S_{\omega}(z_b)$ по частоте ω . При полосе модуляции $\Delta\omega = 0$ формула (17) естественно переходит в выражение (15). Применение сложного сигнала немного уменьшает уровень фазовых искажений за счёт некогерентного сложения спектральных составляющих сигнала модуляции, однако не снимает эту проблему полностью. Поэтому в публикациях [18, 19] был предложен метод обработки сигнала, предусматривающий согласованную со средой фильтрацию изображения при априорно известных свойствах среды, т. е. при известной функции $\tilde{\Phi}_{\omega_0}(z_b, k)$. При такой обработке результирующую оптическую передаточную функцию слоя воды можно представить в виде

$$\text{MTF}_W = \left| \tilde{\Phi}_{\omega_0}(z_b, k) \right|^2. \quad (18)$$

4. НЕКОТОРЫЕ ОЦЕНКИ

Известно, что полная оптическая передаточная функция системы наблюдения через взволнованную поверхность как функция пространственной частоты k и глубины расположения объекта наблюдения z_b может быть представлена в виде произведения согласно работам [7, 8]:

$$\text{MTF}_{\Sigma} = \tilde{F}_S[k, k(H + z_b/m)]\Theta(k, z_b)\text{MTF}_W, \quad (19)$$

где $\Theta(k, z_b)$ — оптическая передаточная функция поверхности, которая в предположении гауссова распределения возвышений поверхности определяется дисперсией уклонов волн σ_{η}^2 согласно работе [22]. Учитывая, что неопределённость угла преломления зондирующего пучка может быть уменьшена за счёт предложенной в работе [14] и описанной в разделе 3 процедуры, дисперсия σ_{η}^2 , являющаяся параметром функции $\Theta(k, z_b)$, должна быть заменена в уравнении (19) величиной $\langle \eta_{\Sigma}^2 \rangle \sigma_{\eta}^2$, где $\langle \eta_{\Sigma}^2 \rangle$ определяется формулой (14). Таким образом, оптическая передаточная функция поверхности принимает вид

$$\Theta(k, z_b) = \exp\left(-\langle \eta_{\Sigma}^2 \rangle \sigma_{\eta}^2 q^2 z_b^2 k^2 / 2\right). \quad (20)$$

Уравнение (19) с учётом формул (17), (18) и (20) позволяет рассчитать оптическую передаточную функцию системы видения с учётом эффектов преломления света на взволнованной поверхности, многократного рассеяния сложно модулированного света в воде и описанных выше методов обработки сигнала.

Оценим предварительно величину $\langle \eta_{\Sigma}^2 \rangle$. На рис. 2 представлен пример расчёта зависимости этой величины от глубины слоя, от которого принимается сигнал обратного рассеяния, используемый для оценки угла. При вычислениях предполагалось, что начальная угловая расходимость пучка подсветки описывается функцией Гаусса: $D(\mathbf{n}) = \exp[-n^2/(2\beta^2)]$ при $\beta = 10^{-3}$ рад, а спектр волнения изотропен и описывается формулой Пирсона—Московитца [23].

С учётом предлагаемой обработки функция $\tilde{\Phi}$ в уравнении (4) должна быть заменена на функцию MTF_W , определяемую уравнениями (17) и (18). Заметим, что на начальном (приповерхностном) участке глубин флуктуации определяются возвышениями поверхности, затем определяющую роль играет фокусировка света уклонами волн и затем, по мере ослабления сигнала, преобладают аппаратные шумы. Эти шумы рассчитаны для обычных характеристик приёмной системы и излучателя (площадь приёмной апертуры $0,03 \text{ м}^2$, мощность излучателя 3 МВт). Повышение энергетического потенциала системы за счёт увеличения мощности излучения и/или площади приёмной апертуры расширяет диапазон глубин, сигнал обратного рассеяния с которых можно использовать для коррекции формируемого изображения, что демонстрирует пунктирная

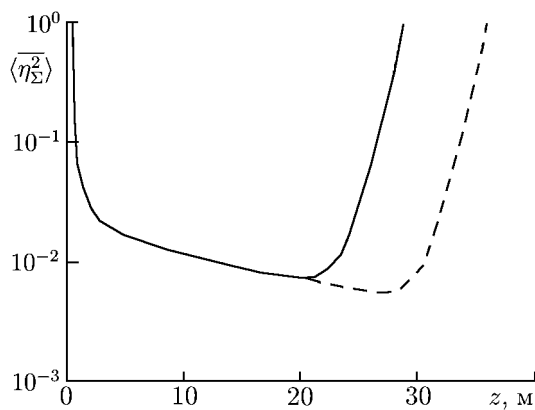


Рис. 2. Дисперсия оценки $\langle \eta_{\Sigma}^2 \rangle$ как функция глубины. Скорость ветра равна 5 м/с, $\sigma = 0,3 \text{ м}^{-1}$, а остальные оптические характеристики воды определяются на основе корреляционных связей, предложенных в работе [21]

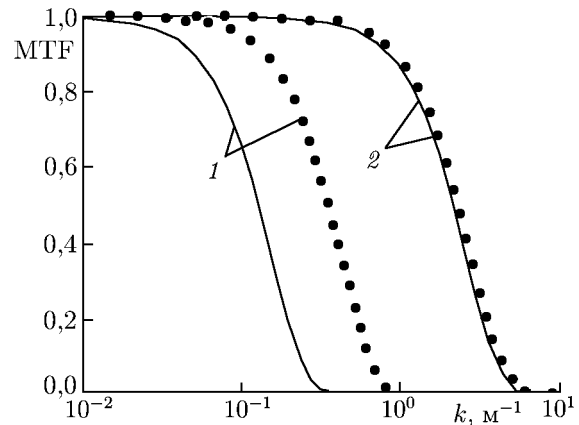


Рис. 3. Оптическая передаточная функция системы видения при различных методах обработки для глубин $z = 40 \text{ м}$ (сплошные линии) и $z = 20 \text{ м}$ (точки); скорость ветра $V = 5 \text{ м/с}$, $\omega/c = 20 \text{ м}^{-1}$, $\Delta\omega = 0,3\omega$, $\sigma = 0,3 \text{ м}^{-1}$

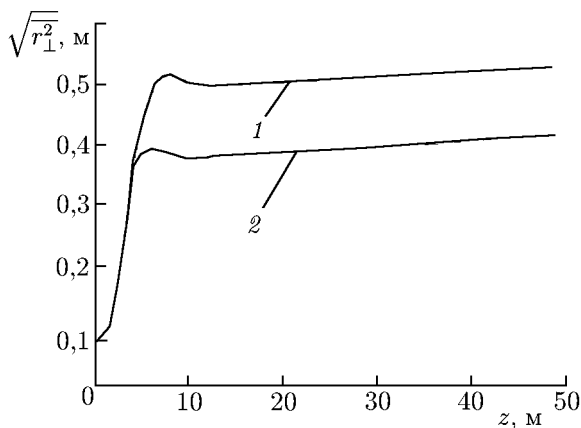


Рис. 4. Среднеквадратичный радиус рассеяния точки как функция глубины при различных частотах модуляции: кривая 1 — $\omega/c = 20 \text{ м}^{-1}$, 2 — $\omega/c = 30 \text{ м}^{-1}$. Характеристики трассы те же, что и для рис. 2 и 3

ветвь кривой $\langle \eta_{\Sigma}^2 \rangle(z)$ на рис. 2. Для этой ветви потенциал системы, т. е. произведение мощности излучателя на площадь приёмной апертуры, увеличен на три порядка по сравнению со сплошной ветвью. Как видно из рис. 2, вполне реально уменьшить угловой разброс зондирующего пучка и, следовательно, неопределённость его положения на объекте наблюдения на два порядка.

Судить об интегральном выигрыше, получаемом за счёт предлагаемой коррекции формируемого изображения, можно по оптическим передаточным функциям различных вариантов систем видения на рис. 3. Кривые 1 есть оптические передаточные функции без коррекции изображения, кривые 2 — оптические передаточные функции поверхности при коррекции угла преломления и согласованной фильтрации изображения, формируемого с помощью сложно модулированного пучка подсветки. Нетрудно видеть, что предлагаемая методика достаточно хорошо компенсирует мешающие факторы и сильно расширяет диапазон пространственных частот, доступных наблюдению.

Замечательное свойство этой методики проявляется в слабой зависимости формируемого разрешения от глубины наблюдения. Начиная с некоторой относительно небольшой глубины, определяемой характеристиками воды и частотой модуляции, оптическая передаточная функция практически не меняется. Этот эффект демонстрируется на рис. 4 зависимостями от глубины среднеквадратичного радиуса рассеяния точки, т. е. нормированного второго момента функции рассеяния точки. Эта величина определяется уравнением

Замечательное свойство этой методики проявляется в слабой зависимости формируемого разрешения от глубины наблюдения. Начиная с некоторой относительно небольшой глубины, определяемой характеристиками воды и частотой модуляции, оптическая передаточная функция практически не меняется. Этот эффект демонстрируется на рис. 4 зависимостями от глубины среднеквадратичного радиуса рассеяния точки, т. е. нормированного второго момента функции рассеяния точки. Эта величина определяется уравнением

$$\overline{r_{\perp}^2} = 4 \operatorname{Re} S_{\omega} + 2 \left(\frac{\Delta \omega}{c} \right)^2 \operatorname{Re} S_{\omega}'' + \langle \eta_{\Sigma}^2 \rangle \sigma_{\eta}^2 q^2 z^2 + 2\beta^2 (H + z/m)^2. \quad (21)$$

Первые два слагаемых в правой части выражения (21) определяются свойствами воды, третье зависит от состояния поверхности, а четвертое обусловлено расходимостью пучка подсветки. На начальном участке глубин эта величина определяется рассеянием в среде и быстро растёт практически независимо от частоты модуляции. На больших глубинах эффекты многократного рассеяния компенсируются «голографической» обработкой изображения по высокочастотной составляющей, т. е. свёрткой функции рассеяния точки с её эталоном. Дальнейшее ухудшение разрешения определяется двумя последними слагаемыми в формуле (21) — начальной расходимостью пучка подсветки и «остаточным» влиянием волнения.

Таким образом, мы показали, что негативное влияние поверхностного волнения и многократного рассеяния света в воде на качество изображения подводных объектов, наблюдаемых из атмосферы, может быть в значительной степени устранено. Несмотря на то, что для предлагаемой методики необходимо несколько усложнить аппаратуру, ожидаемый выигрыш в качестве получаемой информации должен оправдать эти затраты. Для дальнейшего представляется важным определить оптимальный по энергетическим затратам диапазон частот модуляции и, в связи с этим, уточнить использованную модель для описания характеристик волн фотонной плотности в воде.

Автор признателен Л. С. Долину за чрезвычайно полезные дискуссии и советы.
Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 11-05-00384 и 13-05-97059)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долин Л. С., Левин И. М. Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 230 с.
2. Zege E. P., Ivanov A. P., Katsev I. L. Image transfer through a scattering medium. Heidelberg: Springer, 1991. 349 p.
3. Dolin L., Gilbert G., Levin I., Luchinin A. Theory of imaging through wavy sea surface. Nizhny Novgorod: Inst. Appl. Phys., 2006. 171 p.
4. Лучинин А. Г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1981. Т. 17, № 7. С. 732.
5. Лучинин А. Г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32, № 2. С. 296.
6. Гильберт Г. Д., Долин Л. С., Левин И. М. и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42, № 1. С. 126.
7. Зега Э. П., Кацев И. Л., Прихач А. С. // Оптика океана и атмосферы. 1992. Т. 19, № 8. С. 789.
8. Levin I. M., Savchenko V. V., Osadchy V. Ju. // Appl. Opt. 2008. V. 47, No. 35. P. 6650.
9. Долин Л. С., Лучинин А. Г., Турлаев Д. Г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40, № 6. С. 756.
10. Dolin L. S., Luchinin A. G., Titov V. I., Turlaev D. G. // Proc. SPIE. 2007. V. 6615. P. 66150K.
11. Turlaev D. G. // Proc. VI Intern. Conf. "Current Problems in Optics of Natural Waters", St. Petersburg, 2011. P. 264.
12. Weber V. I. // Proc. III Intern. Conf. "Current Problems in Optics of Natural Waters", St. Petersburg, 2005. P. 345.
13. Турлаев Д. Г., Долин Л. С. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, №. С. 370.
14. Dolin L. S., Luchinin A. G. // Appl. Opt. 2008. V. 47, No. 36. P. 6871.
15. Лучинин А. Г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 6. С. 739.

16. Luchinin A. G. // Proc. SPIE. 2012. V. 8 532. P. 85320R.
17. Luchinin A. G. // Proc. VI Intern. Conf. "Current Problems in Optics of Natural Waters", St. Petersburg, 2011. P. 37.
18. Долин Л. С., Лучинин А. Г. // Докл. РАН. 2014. Т. 455, № 6. С. 643.
19. Долин Л. С., Лучинин А. Г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 4. С. 468.
20. Dolin L. S. // Appl. Opt. 2013. V. 52, No. 2. P. 199.
21. Долин Л. С. // Докл. АН СССР. 1981. Т. 260, № 6. С. 1344.
22. Мулламаа Ю.-А. Р. // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11. С. 199.
23. Pierson W., Moskowitz L. // J. Geophys. Res. 1964. V. 69, No. 24. P. 5181.
24. Левин И. М., Копелевич О. В. // Океанология. Т. 47, № 3. С. 344.

Поступила в редакцию 23 октября 2013 г.; принята в печать 17 января 2014 г.

PRINCIPLES OF DESIGNING AN "IDEAL" IMAGING SYSTEM THROUGH A ROUGH WATER SURFACE

A. G. Luchinin

We propose new principles for designing an imaging system through a rough water surface. These principles permit one to reduce the negative impact of the surface roughness and multiple scattering in water on the spatial resolution. The system model in which the image of underwater objects is formed by angular scanning with an illumination beam is considered. Image distortions in such a system are due mainly to random variations in the refraction angle of a laser beam on the surface and can be eliminated if the true direction of input of the beam into water is known. Information on the beam refraction angle is suggested to be taken from the angular distribution of the radiance of the signal backscattered by the subsurface water layer. Reduced impact of multiple scattering in water is reached by high-frequency modulation of the beam power by a complex signal and matched processing in the reception system. It is shown that a combination of proposed imaging techniques gives an essential gain in the resolution of the airborne imaging system.