

Nghiên cứu tính toán năng lượng xung laser cho thiết bị quan sát dưới nước

Thái Hoài Sơn, Hoàng Văn Phòng, Nguyễn Hồng Hạnh*

Viện Vật lý Kỹ thuật, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.

*Email: hanh2904@gmail.com

Nhận bài: 20/8/2023; Hoàn thiện: 10/11/2023; Chấp nhận đăng: 15/11/2023; Xuất bản: 10/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2023.111-118>

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả tính toán lý thuyết năng lượng chiếu sáng xung laser của thiết bị quan sát dưới nước. Sử dụng mô phỏng các điều kiện môi trường, đối tượng quan sát, các thông số độ rộng xung, tần lặp của laser và hệ quang vật kính thu ảnh, từ đó, xác định được năng lượng xung laser chiếu sáng phụ thuộc vào cự ly quan sát. Cụ thể, kết quả đã chỉ ra để đạt được cự ly phát hiện mục tiêu người đến 30 m và nhận dạng đến 27 m cần sử dụng nguồn chiếu sáng laser có năng lượng xung tối thiểu là 5 mJ (với độ rộng xung 3 ns và tần lặp xung 1 kHz). Kết quả này đảm bảo cho việc lựa chọn năng lượng chiếu sáng xung laser phù hợp cho thiết bị quan sát dưới nước theo yêu cầu về cự ly quan sát mục tiêu.

Từ khoá: Thiết bị quan sát dưới nước; Laser xung; Hình ảnh laser dưới nước theo khoảng gate.

1. MỞ ĐẦU

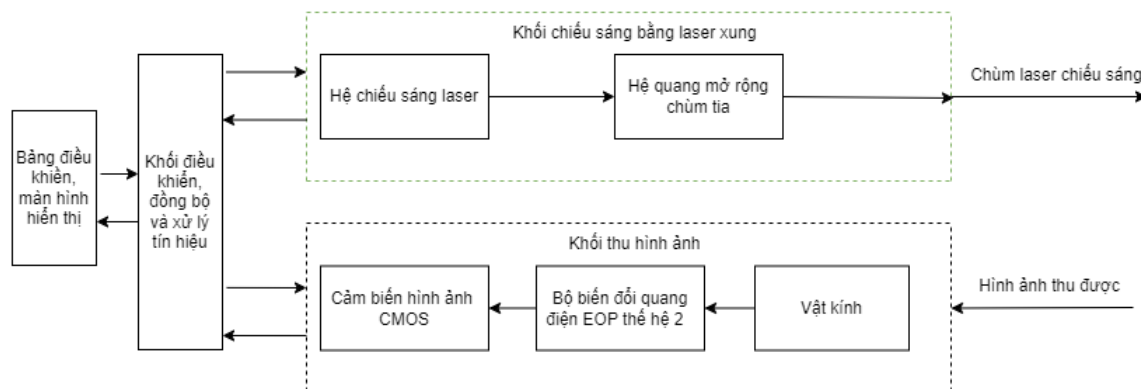
Các đại dương chiếm khoảng 71% bề mặt trái đất trong đó 95% diện tích chưa khai thác. Hiện nay các thiết bị quan sát dưới nước giữ vai trò quan trọng trong việc nghiên cứu đại dương, tìm kiếm cứu nạn, cứu hộ, phục vụ cho các hoạt động quân sự,... Bên cạnh các hệ thống quan sát dưới nước sử dụng sóng âm thanh (sonar), trong thời gian gần đây, các thiết bị quang học dưới nước được các nhà khoa học trên thế giới tập trung nghiên cứu và phát triển. Ưu điểm của hệ thống quan sát quang học dưới nước so với các hệ thống sonar truyền thống là hình ảnh trực quan và có độ phân giải cao hơn. Tuy nhiên, do tác động mạnh của hiện tượng suy giảm tín hiệu, gây ra bởi sự hấp thụ và tán xạ mạnh của ánh sáng trong môi trường nước, chất lượng và tầm quan sát của các hệ thống quang học dưới nước bị giảm đi đáng kể. Để khắc phục tình trạng này, các hệ thống quan sát dưới nước được nghiên cứu sử dụng thêm nguồn phát sáng chủ động (thường là laser bước sóng 532 nm [1]) để tăng cường tín hiệu thu được và khoảng cách quan sát của các hệ thống này.

Năm 2014, Christnacher và cộng sự [2] đã phát triển hệ thống quan sát dưới nước SeaLVi4, sử dụng laser có tần số lặp lại 21 kHz và độ rộng xung là 2 ns ở bước sóng 532 nm với công suất 170 mW để chiếu sáng với trường nhìn FOV $17^\circ \times 13^\circ$. Vào năm 2018, Mariani và cộng sự [3] đã công bố các kết quả của hệ thống quan sát dưới nước UTOFIA với hệ chiếu sáng laser có độ rộng xung 1,8 ns, tần số lặp lại 1 kHz và cho cự ly quan sát là 4 lần độ dài suy giảm (AL). Năm 2017, Liu và cộng sự [4] đã phát triển một hệ thống chụp ảnh laser giám sát dưới nước (UGLIS), sử dụng tần số lặp lại $30 \div 50$ kHz và độ rộng xung 8 ns, ở bước sóng laser 532 nm với công suất 3 W để chiếu sáng với góc chiếu sáng FOV từ $1 \div 6^\circ$. Vào năm 2018, Wang và cộng sự [5] đã phát triển một hệ thống hình ảnh 3D quan sát dưới nước Fengyan. Nó trang bị tần số lặp lại 30 kHz và độ rộng xung laser 1 ns ở bước sóng 532 nm với công suất 0,5 W.

Đặc điểm chung của các công bố đã đưa ra được các mô hình thực nghiệm về các hệ thống quan sát dưới nước sử dụng nguồn xung laser 532 nm để chiếu sáng mục tiêu nhằm gia tăng cự ly quan sát. Tuy nhiên, ở mỗi mô hình cụ thể, các tác giả lại sử dụng một nguồn sáng xung laser với năng lượng xung khác nhau mà chưa đưa ra được các cơ sở khoa học để lựa chọn năng lượng laser chiếu sáng phù hợp với hệ thống được thiết kế. Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu đưa ra một phương pháp tính toán năng lượng xung laser sử dụng để chiếu sáng phù hợp với các thông số của thiết bị quan sát dưới nước và điều kiện môi trường sử dụng.

2. ĐIỀU KIỆN QUAN SÁT VÀ CÁC THÔNG SỐ ĐỂ TÍNH TOÁN NĂNG LƯỢNG LASER TRONG THIẾT BỊ QUAN SÁT DƯỚI NƯỚC

Cấu tạo của thiết bị quan sát dưới nước sử dụng nguồn chiếu sáng laser xung gồm 3 khối chính: Khối chiếu sáng bằng xung laser, khối thu nhận hình ảnh, khối điều khiển và đồng bộ tín hiệu thu phát laser. Sơ đồ khối các thành phần của thiết bị được thể hiện trong hình 1.



Hình 1. Sơ đồ khối thiết bị quan sát dưới nước.

Việc tính toán lý thuyết mô phỏng nhằm xác định và lựa chọn nguồn laser xung chiếu sáng phù hợp cho thiết bị quan sát dưới nước biển là một bài toán rất phức tạp vì nó phụ thuộc vào nhiều yếu tố môi trường như: nồng độ muối và các chất huyền phù trong nước biển, nhiễu động môi trường biển... Để tính toán xác định được năng lượng nguồn laser chiếu sáng cần dùng chúng tôi đưa ra giả thuyết về một số thông số của điều kiện môi trường và thông số đầu vào cụ thể như sau:

2.1. Các giả thuyết về điều kiện và mục tiêu quan sát

Sử dụng thiết bị quan sát dưới nước chiếu sáng bằng laser xung trong điều kiện môi trường nước biển. Đặc trưng quang học của nước biển là độ trong được đo bằng khoảng cách nhìn thấy đĩa bạc (đĩa Secchi) bán kính 30 cm [5], độ trong suốt của đại dương tối đa đo được là 66 m [6]. Ở đây, nhóm nghiên cứu tính toán cụ thể phát hiện và nhận dạng đối tượng quan sát là người trong điều kiện độ trong của nước biển là $z_b = 25$ m với giả thiết các thông số cụ thể như sau: chiều cao của mục tiêu quan sát: $H = 1,6$ m; hệ số phản xạ bề mặt của mục tiêu tại bước sóng 532 nm: $\rho_v = 0,55$; hệ số phản xạ của phòng nền tại bước sóng 532 nm: $\rho_p = 0,15$; xác suất phát hiện và xác suất nhận dạng mục tiêu: $P_{PH} = 0,9$, $P_{ND} = 0,8$.

2.2. Thông số của kênh phát chiếu sáng xung laser

Đối với các thiết bị quan sát dưới nước sử dụng nguồn chiếu sáng bằng laser xung mà chúng tôi đã giới thiệu ở trên thì người ta thường sử dụng laser bước sóng vùng 532 nm. Vì vậy, nguồn laser chiếu sáng của thiết bị với các thông số giả thiết như sau: bước sóng làm việc: $\lambda = 532$ nm; năng lượng xung chiếu sáng Laser: A_0 , mJ; độ dài xung: $t_x = 3$ ns; góc mở xung laser tại đầu ra kênh phát: $2\alpha_p = 10^\circ$; tần số lặp xung: $f = 1$ kHz.

2.3. Thông số của kênh thu tín hiệu

Kênh thu tín hiệu sử dụng vật kính quan sát truyền tín hiệu đến đầu thu ảnh. Ở đây, chúng tôi sử dụng đầu thu ảnh là ICCD của hãng Photonic (Anh) [7] hoặc Inocturn HI-QE Green của hãng Photonis (Hà Lan) [8] có chức năng đóng mở gate sử dụng cảm biến CCD hoặc CMOS tích hợp bộ biến đổi quang điện (EOP) thế hệ 2. Thông số của đầu thu được thể hiện trong tài liệu [7, 8].

Thông số của vật kính kênh thu sử dụng trong bài toán này cụ thể như sau: tiêu cự vật kính: $f_v = 100$ mm; đường kính thông quang: $D_v = 50$ mm; hệ số truyền qua: $\tau_v = 0,8$.

2.4. Thông số mạch xử lý tín hiệu

Tần số mạch xử lý hình ảnh $f_c = 100$ MHz.

2.5. Thông số của màn hình hiển thị hình ảnh

Tín hiệu hình ảnh mục tiêu thu được qua hệ thống quan sát được hiển thị lên màn hình cho người quan sát. Trong bài toán này, nhóm nghiên cứu lựa chọn loại màn hình kích thước 31,5 inch phổ biến trên thị trường để hiển thị hình ảnh thu được này, các thông số của màn hình hiển thị cụ thể như sau: kích thước đường chéo màn hình hiển thị: 31,5 inch; số lượng điểm ảnh: 3840 x 2160; kích thước pixel: 0,272 x 0,272 mm; độ sáng của màn hình hiển thị: $L_{MH} = 35$ cd/m².

2.6. Thông số kỹ thuật về khả năng quan sát của mắt người

Hình ảnh hiển thị qua màn hình được quan sát bởi mắt người, giả định người quan sát có khả năng quan sát bình thường, các thông số cụ thể của mắt người bình thường như sau: khoảng cách quan sát: $R = 0,5$ m; thời gian lưu ảnh trên võng mạc: $t_M = 0,2$ s [9]; tỉ lệ tín trên tạp SNR để xác định độ phân giải nhỏ nhất: 2,5 [10].

3. TÍNH TOÁN CỤ LY HOẠT ĐỘNG CỦA THIẾT BỊ QUAN SÁT DƯỚI NƯỚC PHỤ THUỘC VÀO NĂNG LƯỢNG LASER XUNG CHIỀU SÁNG

3.1. Xác định hàm truyền của kênh thu bức xạ thiết bị quan sát

Để có thể tính toán xác định mối quan hệ giữa cự ly hoạt động của thiết bị quan sát dưới nước với năng lượng laser xung chiều sáng, nhóm nghiên cứu cần đưa ra mô hình toán học các quá trình truyền và tái tạo hình ảnh của mục tiêu thu được thông qua thiết bị quan sát trong môi trường nước biển. Mục tiêu quan sát có thể được xem là một tập hợp thông tin (độ sáng) trong không gian và thời gian $s(x, y, z, \lambda, t)$ (trong đó: x, y, z là tọa độ không gian của mục tiêu, λ là bước sóng phát xạ/phản xạ từ mục tiêu, t là tọa độ thời gian của mục tiêu). Những thông tin này của mục tiêu được truyền trong môi trường nước biển và thu nhận, tái tạo bởi thiết bị quan sát dưới nước tạo ra hình ảnh của mục tiêu $s'(x', y', z', \lambda', t')$. Môi trường nước biển và thiết bị quan sát có thể được xem là các kênh truyền tín hiệu. Ảnh hưởng của kênh truyền tín hiệu lên hình ảnh thu nhận được của mục tiêu được mô tả bằng hàm truyền (MTF) của kênh truyền [11]. Hàm truyền (MTF) của kênh thu bức xạ $T_{KT}(\vartheta_x, \vartheta_y)$ thiết bị quan sát được tính toán theo công thức sau [12]:

$$T_{KT}(\vartheta_x, \vartheta_y) = T_{OK}(\vartheta_x, \vartheta_y) \cdot T_{EOP}(\vartheta_x, \vartheta_y) \cdot T_{CB}(\vartheta_x, \vartheta_y) \cdot T_{MXL}(\vartheta_x, \vartheta_y) \cdot T_{MH}(\vartheta_x, \vartheta_y) \cdot T_M(\vartheta_x, \vartheta_y) \quad (1)$$

Trong đó: $T_{OK}(\vartheta_x, \vartheta_y)$, $T_{EOP}(\vartheta_x, \vartheta_y)$, $T_{CB}(\vartheta_x, \vartheta_y)$, $T_{MXL}(\vartheta_x, \vartheta_y)$, $T_{MH}(\vartheta_x, \vartheta_y)$, $T_M(\vartheta_x, \vartheta_y)$ tương ứng lần lượt là các hàm truyền của vật kính kênh thu bức xạ, EOP, cảm biến hình ảnh, truyền của mạch xử lý hình ảnh, màn hình hiển thị và mắt người; ϑ_x, ϑ_y là tần số không gian, (mm⁻¹).

3.2. Xác định tính chất quang học của nước biển và xác định hàm truyền của tín hiệu trong môi trường nước biển

Ánh sáng truyền trong nước biển bị suy giảm bởi hai hiện tượng chính là tán xạ và hấp thụ. Trong đó, hiện tượng tán xạ ánh sáng xảy ra chủ yếu do các chất huyền phù trong nước và được đặc trưng bởi hệ số tán xạ ánh sáng σ . Cường độ hấp thụ ánh sáng trong môi trường nước biển xảy ra phụ thuộc vào các thành phần của nước, được đặc trưng bởi hệ số hấp thụ k_{HT} . Các thông số của môi trường nước biển được tính toán cụ thể theo tài liệu [13] thu được kết quả trong bảng 1:

Bảng 1. Các thông số quang học của môi trường nước biển.

z_b, m	Λ	ε, m^{-1}	μ	k_{HT}, m^{-1}
25	0,78	0,2	0,072	0,044

Trong đó: ε là hệ số suy giảm ánh sáng trong nước biển; Λ là xác suất photon ánh sáng còn tồn tại trong môi trường nước; μ là hệ số chỉ thị tán xạ ánh sáng trong môi trường nước.

Ta có hàm truyền tán xạ trong môi trường nước biển [12]:

$$T_{B.TX}(v') = \exp \left[-\Lambda \varepsilon z + \frac{\Lambda \varepsilon z}{\sqrt{(2\pi\mu v')^2 + 1}} \right] \quad (2)$$

Hàm truyền trong trường hợp nhiễu động môi trường nước biển [12]:

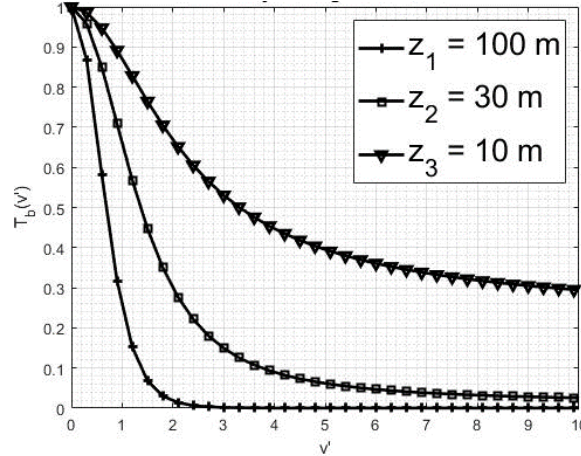
$$T_{B.ND}(v') = \exp \left[-\frac{(\Lambda v' k_{HT})^2 \langle \Delta n \rangle^2 z}{3a} \right] \quad (3)$$

Với môi trường nước biển, chiết suất của môi trường $n = 1,34$; $\langle \Delta n \rangle = 10^{-9}$; $a = 0,5$ m là quy mô không gian đặc trưng của giá trị chiết suất.

Như vậy, module hàm truyền tổng trong môi trường nước biển được tính theo công thức [6]:

$$T_B(v') = T_{B.TX}(v') \cdot T_{B.ND}(v') \quad (4)$$

Biểu đồ biểu thị sự thay đổi của hàm truyền trong môi trường nước biển phụ thuộc vào cự ly quan sát mục tiêu được thể hiện trong hình 2.



Hình 2. Hàm truyền của môi trường nước biển đối với mục tiêu ở các cự ly khác nhau: $z_1 = 100$ m, $z_2 = 30$ m, $z_3 = 10$ m.

3.3. Xác định độ tương phản của mục tiêu quan sát

Độ tương phản gốc giữa vật và phông nền được xác định theo công thức [12]:

$$k_{vp} = \frac{\rho_v - \rho_p}{\rho_v + \rho_p} \quad (5)$$

Với $\rho_v = 0,55$ và $\rho_p = 0,15$ như giả thiết ở trên, thay vào (5), ta có: $k_{vp} = 0,57$.

Độ tương phản của mục tiêu so với phông nền k_{vp}^{CB} được xác định tại mặt phẳng ảnh, khác với độ tương phản gốc k_{vp} và nó được tính toán theo công thức sau [12]:

$$k_{vp}^{CB} = \frac{k_{vp} T_{MT}(v')}{1 + \frac{2 \cdot n_{TXN}}{n_v + n_p}} \quad (6)$$

Trong đó, n_v và n_p là số lượng photon mà mỗi pixel cảm biến nhận được. Do kênh thu của thiết bị quan sát sử dụng ICCD hoặc Inocturn có chức năng đóng mở cửa sổ điện tử nên có thể xem số lượng hạt quang điện do hiện tượng nhiễu tán xạ ngược thu được của cảm biến $n_{TXN} = 0$. Do đó:

$$k_{vp}^{CB} = k_{vp} T_B(v') = 0,57 \cdot T_B(v') \quad (7)$$

3.4. Xác định độ tương phản phân giải nhỏ nhất

Độ phân giải được xác định theo công thức [12]:

$$k_{min}(v') = \frac{\pi}{16} \frac{SNR_{min}}{T_{KT}(v') \sqrt{0,5(n_v + n_p + n_{TXN})}} \sqrt{\frac{\alpha_T}{t_m f_k q_m}} v' \quad (8)$$

Trong đó, q_m là tỷ lệ kích thước cặp vạch của mia đánh giá, thường đối với hệ thống quang học ngày tỷ lệ này được sử dụng là 7:1. Tỷ lệ tín trên tạp SNR_{min} để xác định độ phân giải nhỏ nhất theo nguyên tắc là phụ thuộc vào tần số không gian của mục tiêu quan sát, tuy nhiên, có thể thực hiện theo phương pháp FLIR-92 giá trị này giống nhau với tất cả các điều kiện phát hiện mục tiêu và bằng 2,5 [10].

3.5. Xác định cự ly quan sát của thiết bị quan sát dưới nước

Cự ly quan sát z của thiết bị quan sát dưới nước laser xung chủ động là điểm giao cắt của đồ thị hàm số độ phân giải tương phản nhỏ nhất và độ tương phản quan sát được. Các hàm số trên được biểu diễn dưới dạng hàm số phụ thuộc vào cự ly quan sát, như vậy là: $k_{min}(z)$ và $k_{vp}^{CB}(z)$. Điều này được thực hiện nhờ mối liên hệ giữa tần số không gian v' và với cự ly quan sát z trên cơ sở của tiêu chuẩn Johnson [14]:

$$v' = \frac{N \cdot z}{H} \quad (9)$$

Trong đó: N - Số chu kỳ của mia tương đương, được đặt lên kích thước giới hạn của mục tiêu quan sát; H - Chiều cao mục tiêu. Tiêu chuẩn hiện đại (biến thể của tiêu chuẩn Johnson) xác định chu kỳ của mia tương đương với mục tiêu theo bảng sau [14]:

Bảng 2. Tiêu chuẩn hiện đại xác định chu kỳ của mia [14].

Mức độ quan sát	N_{50}
Phát hiện	1,0
Phân biệt	4,0
Nhận dạng	8,0

Trong đó, N_{50} là số chu kỳ khi xác suất, phát hiện, phân biệt, nhận dạng mục tiêu là 50%. Số chu kỳ tương đương sẽ được tính theo công thức sau:

$$N = p_0 \times N_{50} \quad (10)$$

trong đó, p_0 là hạng số được cho theo bảng sau [15]:

Bảng 3. Các giá trị của hạng số p_0 theo xác suất [15].

Xác Suất	1,0	0,95	0,8	0,5	0,3	0,1	0,02	0
Hạng số p_0	3,0	2,0	1,5	1,0	0,75	0,50	0,25	0

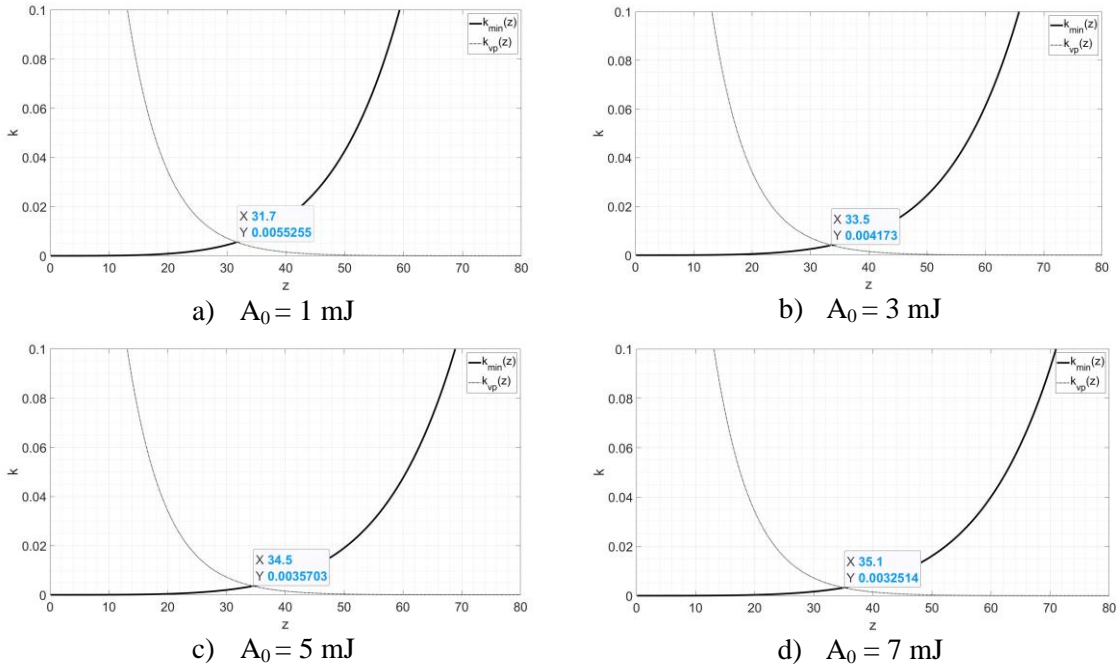
Xác suất phát hiện mục tiêu là $P_{PH} = 0,9$; Xác suất nhận dạng vật thể: $P_{ND} = 0,8$. Như vậy, chu kỳ của mia tương đương có các giá trị như sau:

$$N_{p\Box} = 0,9 \times 2 = 1,8 \text{ và } N_{nd} = 8 \times 1,5 = 12 \quad (11)$$

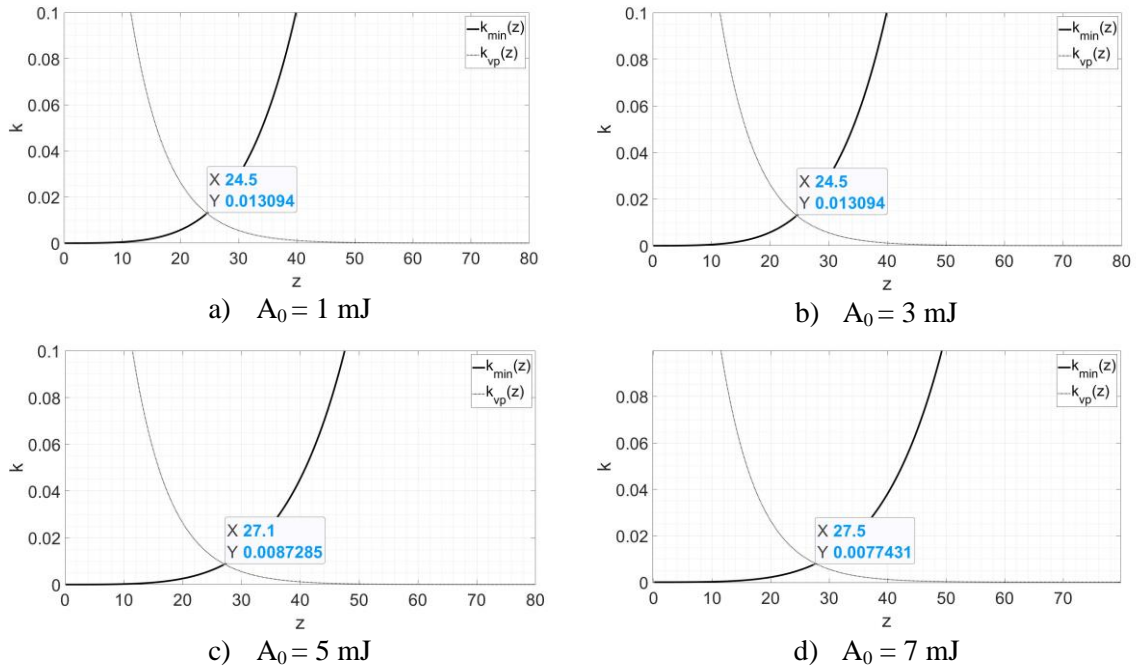
Với kích thước mục tiêu $H = 1,6$ m ta có sự phụ thuộc của tần số không gian vào cự ly quan sát khi phát hiện mục tiêu là: $v' = 1,125z \text{ rad}^{-1}$ và khi nhận dạng mục tiêu: $v' = 7,5z \text{ rad}^{-1}$.

Thay giá trị này vào công thức tính hàm số độ phân giải tương phản nhỏ nhất và độ tương phản quan sát được ta nhận được sự phụ thuộc các hàm số trên vào giá trị cự ly quan sát $k_{min}(z)$ và $k_{vp}^{CB}(z)$. Với laser chiếu sáng có năng lượng A_0 và độ rộng xung 3ns, tần lặp 1 kHz, mục tiêu có chiều cao $H = 1,6$ m, xác suất phát hiện $P_{PH} = 0,9$, xác suất nhận dạng mục tiêu $P_{ND} = 0,8$ ta nhận được đồ thị biểu diễn phụ thuộc các hàm số $k_{min}(z)$ và $k_{vp}^{CB}(z)$ vào cự ly quan sát z như hình 3 và hình 4. Trong đó:

- Hàm số $k_{min}(z)$ là hàm số độ phân giải tương phản nhỏ nhất của mục tiêu (để mắt người có thể phân biệt được).
- Hàm số $k_{vp}^{CB}(z)$ là hàm số độ tương phản quan sát được (độ tương phản của mục tiêu so với phông nền).

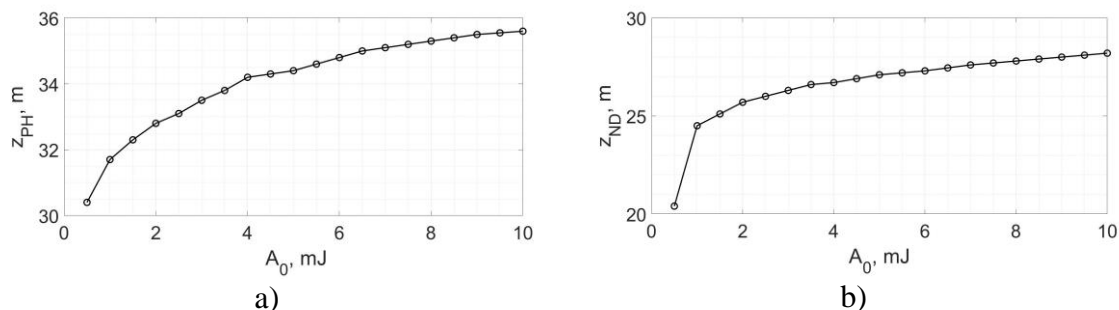


Hình 3. Đồ thị biểu diễn phụ thuộc các hàm số $k_{min}(z)$ và $k_{vp}^{CB}(z)$ vào cự ly quan sát z khi xác suất phát hiện $P_{PH} = 0,9$ với các mức năng lượng laser A_0 khác nhau.



Hình 4. Đồ thị biểu diễn phụ thuộc các hàm số $k_{min}(z)$ và $k_{vp}^{CB}(z)$ vào cự ly quan sát z khi xác suất nhận dạng $P_{ND} = 0,8$ với các mức năng lượng laser A_0 khác nhau.

Từ các tính toán về cự ly quan sát mục tiêu tối đa với các nguồn chiếu sáng laser khác nhau, ta nhận được đồ thị về mối tương quan giữa năng lượng chiếu sáng laser và cự ly quan sát mục tiêu được biểu diễn như hình 5.



Hình 5. Đồ thị biểu diễn phụ thuộc của cự ly quan sát mục tiêu z vào năng lượng xung laser chiếu sáng A_0 khi: a) $P_{PH} = 0,9$; b) $P_{ND} = 0,8$.

Đồ thị hình 5 ở trên cho thấy, để đạt được cự ly phát hiện mục tiêu đến 30 m và cự ly nhận dạng mục tiêu đến 27 m cần sử dụng nguồn laser có năng lượng xung A_0 tối thiểu là 5 mJ (với độ rộng xung 3 ns và tần lặp xung 1 kHz). Khi năng lượng xung laser vượt quá 5 mJ, cự ly phát hiện và nhận dạng mục tiêu tăng lên không đáng kể.

Các kết quả hình 3, hình 4 và hình 5 ở trên là những tính toán lý thuyết nhằm đưa ra mối tương quan giữa năng lượng chiếu sáng laser và cự ly quan sát mục tiêu. Đây là mô hình tính toán lý thuyết lý tưởng, nhóm nghiên cứu tạm thời bỏ qua các yếu tố thiết kế, gia công hệ quang như: chất lượng thiết kế vật kính thu ảnh, vật kính mở rộng chùm tia laser và chất lượng gia công, lắp ráp các vật kính này. Trong giai đoạn tiếp theo, nhóm nghiên cứu hy vọng có thể chính xác hóa hơn mối tương quan trên khi đã đo chính xác được hàm truyền MTF của vật kính, bộ biến đổi quang điện,... sau khi gia công, lắp ráp và tổng lắp trong thiết bị quan sát dưới nước hoàn chỉnh.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu đã trình bày các kết quả mô phỏng tính toán năng lượng chiếu sáng laser cho thiết bị quan sát dưới nước với các giả thuyết về điều kiện môi trường, đối tượng quan sát, các thông số của laser và hệ quang vật kính thu ảnh. Các kết quả cho thấy mối quan hệ giữa cự ly hoạt động của thiết bị quan sát với công suất xung laser phát ra. Cụ thể, để đạt được cự ly phát hiện mục tiêu đến 30 m và cự ly nhận dạng mục tiêu đến 27 m cần sử dụng nguồn laser có năng lượng xung A_0 tối thiểu là 5 mJ. Khi năng lượng xung laser vượt quá 5 mJ, cự ly phát hiện và nhận dạng mục tiêu tăng lên không đáng kể. Các kết quả thu được giúp cho thiết bị có thể quan sát được các mục tiêu ở các cự ly nhất định phụ thuộc vào năng lượng laser chiếu sáng trong môi trường nước biển đầy thách thức.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả cảm ơn sự tài trợ về kinh phí của đề tài “Nghiên cứu thiết kế, chế tạo khi tời quan sát dưới nước phục vụ bảo vệ khu vực trọng yếu và tìm kiếm cứu nạn, cứu hộ trên biển” để hoàn thiện bài báo trên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Y. Shen *et al*, “Underwater Optical Imaging: Key Technologies and Applications Review,” IEEE Access, **Vol. 9**, pp. 85500-85514, (2021).
- [2]. F. Christnacher *et al*, “3D laser gated viewing from a moving submarine platform,” Proc. SPIE, **Vol. 9250**, p. 920500, (2014).
- [3]. P. Mariani *et al*, “Range-gated imaging system for underwater monitoring in ocean environment,” Sustainability, **Vol. 11**, p. 162, (2018).

-
- [4]. X. Liu *et al*, “Automatic fishing net detection and recognition based on optical gated viewing for underwater obstacle avoidance,” *Opt. Eng.*, **Vol. 56**, p. 083101, (2017).
- [5]. J. E. Tyler *et al*, “The Secchi disc,” *Limnology and Oceanography*, **Vol. 13**, pp. 1-6, (1968).
- [6]. T. Berman *et al*, “A. Secchi disk depth record: A claim for the eastern Mediterranean,” *Limnology and Oceanography*, **Vol. 30(2)**, pp. 447-448, (1985).
- [7]. <https://photonicscience.com/products/iccd-cameras/intensified-ccd-cmos-camera/>.
- [8]. <https://www.photonis.com/products/inocturn>.
- [9]. Грузевич Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения. - М.: ФИЗМАТЛИТ. - 276 с. - ISBN 978-5-9221-1550-6. 40, (2014).
- [10]. L. B. Scott *et al*, “Modeling staring thermal systems with FLIR92,” *Proc. SPIE*, **Vol. 1993**, pp. 21–26, (1969).
- [11]. “Теория оптико-электронных систем”: Учебник для студентов вузов по оптическим специальностям./Г. М. Мосягин, В. Б. Немтиенов, Е. Н. Лебедев. -М.: Машиностроение, pp. 13-24, (1990).
- [12]. Карасик В. Е. “Лазерные системы видения : учебное пособие для вузов” / В. Е. Карасик, В. М. Орлов. - Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, (2001).
- [13]. Иванов А.П. “Обнаружение глубинных зон повышенной прозрачности морской воды методом импульсного лазерного зондирования”, *Оптика атмосферы и океана*, 9, N 12 (1996).
- [14]. Arnold Daniels *et al*, “Field guide to infrared systems, detectors, and FPAs”/Third edition. Bellingham, Washington, USA : SPIE Press, pp. 109-111, (2018).
- [15]. N. S. Kopeika *et al*, “A System Engineering Approach to Imaging,” SPIE Optical Engineering Press, pp. 341-347, (1998).

ABSTRACT

Research and calculate the theory of laser pulse energy for water observation equipment

In this paper, the results of the theoretical calculation of laser pulse illumination energy of underwater observation equipment were presented. Using a simulation of environmental conditions, observed objects, parameters of laser pulse width, repetition frequency and optical objective system to obtain images, thereby determining the laser pulse energy depending on the distance. Specifically, the results had shown that to achieve human target detection distance of up to 30 m and identification to 27 m, it is necessary to use a laser with a pulse energy of at least 5 mJ (with a pulse width of 3 ns and frequency of 1kHz). This result ensures the selection of suitable laser pulse illumination energy for underwater observation equipment according to the requirement of target observation distance.

Keywords: Underwater vision devices; Pulsed lasers; Range-gated underwater laser imaging.