

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-147-152
УДК 551.46+551.501.8

А.А. Гаджиев¹, Р.А. Эминов², Х.Г. Асадов³

¹ Институт водных проблем, Баку, Азербайджанская Республика

² Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджанская Республика

³ НИИ Аэрокосмической информатики, Баку, Азербайджанская Республика

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИНИМАЛЬНОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ ОБНАРУЖИВАЕМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ НА МАЛОЙ ГЛУБИНЕ ВОДОЕМОВ

Объект и цель научной работы. Объект исследования – порядок размещения различных предметов на дне водоемов. Цель – достижение максимальной внешней незаметности таких предметов. Предполагаемый поиск или случайное обнаружение донных объектов может быть осуществлено батиметрическим методом, т.е. методом оценки толщи воды над ними.

Материалы и методы. Предполагается, что для обнаружения подводных объектов используется низколетящий беспилотный летательный аппарат (БПЛА), снабженный лазерным батиметрическим излучателем. С учетом некоторых упрощений осуществлена оптимизация работы лазерного батиметрического обнаружителя размещенных на дне объектов. Задача обнаружения подводного объекта считается решенной при уверенной регистрации разницы между сигналами, отраженными от дна моря и от искомого подводного предмета. Минимальная внешняя обнаруживаемость достигается при минимальной величине указанной разницы.

Основные результаты. Составлен целевой функционал, характеризующий суммарный сигнал от множества подводных объектов. В результате проведенной оптимизации определено условие, при котором достигается минимум целевого функционала. Согласно полученному результату, суммарный отраженный от подводных объектов сигнал достигает минимума, если высота подводных объектов и коэффициент их отражения изменяются парафазно, т.е. рост одного сопровождается уменьшением другого.

Закключение. Предложен и теоретически обоснован метод обеспечения минимальной обнаруживаемости установленных на дне складированных объектов. Определен практический порядок складирования различных объектов на дне, при котором обеспечивается их скрытность для батиметрического обнаружителя с использованием лазерного источника, установленного на низколетящем БПЛА.

Ключевые слова: батиметрия, измерения, отражение, донный объект, беспилотный летательный аппарат.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP SIGNATURES

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-147-152
UDC 551.46+551.501.8

A.A. Gadzhiev¹, R.A. Eminov², Kh.G. Asadov³

¹ Research Institute of Water Problems, Baku, Republic of Azerbaijan

² Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan

³ Aerospace Informatics Research Institute, Baku, Republic of Azerbaijan

SOLUTION TO THE PROBLEM OF MINIMUM DISTANCE DETECTION OF VARIOUS OBJECTS IN SHALLOW WATER DEPTH

Для цитирования: Гаджиев А.А., Эминов Р.А., Асадов Х.Г. Решение задачи обеспечения минимальной дистанционной обнаруживаемости различных объектов на малой глубине водоемов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 2(400): 147–152.

For citations: Gadzhiev A.A., Eminov R.A., Asadov Kh.G. Solution to the problem of minimum distance detection of various objects in shallow water depth. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 2(400): 147–152 (in Russian).

Object and purpose of research. The object of research is arrangement of various items on the bottom of water bodies. The purpose of research is achieving maximum invisibility for such items. Anticipated search or accidental detection of bottom objects can be carried out by the bathymetric method, i.e. assessment of water column over such objects.

Materials and methods. It is expected that low flying UAVs (unmanned aerial vehicles) equipped with bathymetric laser emitter are used for detection of underwater objects. With consideration of some simplifications, optimization is carried out for the operation of bathymetric laser detector of objects located on the sea bed. The task of detecting an underwater object is considered to be solved when the difference between the signals reflected from the sea bed and underwater object is reliably recorded. Minimum external detectability is achieved at minimum of the said difference.

Main results. An objective functional is obtained to characterize the total signal from multiple underwater objects. As a result of performed optimization, the condition is determined at which the minimum of the objective functional is achieved. According to the obtained result, the total signal reflected from an underwater object reaches its minimum if the height of underwater objects and their reflection coefficient vary paraphase, i.e. the growth of one is accompanied with the reduction of the other.

Conclusion. A method for minimum detectability of objects stacked on the sea bed is suggested and validated. Practical procedures of storing various objects on the sea bed are defined, which ensures their invisibility for the bathymetric laser detector onboard the low-flying UAV.

Keywords: bathymetry, measurements, reflection, bottom object, unmanned aerial vehicle.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Необходимость размещения объектов на дне водоемов возникает при решении задач временного подводного хранения различных токсичных веществ, взрывоопасных предметов, складирования оборудования для проведения подводных работ. Очевидно, что отмеченные на специальных картах места размещения подобных предметов должны быть незаметными для внешнего наблюдения.

Предполагаемый поиск или случайное обнаружение донных объектов может быть осуществлено батиметрическим методом, т.е. методом оценки толщи воды над ними.

Известно, что радары или сонары используют принцип измерения временного промежутка между моментом запуска зондирующего сигнала и моментом приема сигнала.

В то же время самолетные лазерные измерители используют принцип измерения промежутка времени между достижением лазером поверхности водной среды и достижением поверхности подводного искомого объекта [1]. Отметим, что с развитием беспилотной летательной техники разница между этими принципами существенно уменьшилась. Следовательно, анализ работы низколетящего беспилотного летательного аппарата (БПЛА), снабженного лазерным батиметрическим излучателем, может быть осуществлен с учетом некоторых упрощений, применительно к различным атмосферным эффектам, влияющим на величину и форму принимаемого с объекта отраженного сигнала.

С учетом вышеизложенного вкратце рассмотрим возможность введения таких упрощений в целях дальнейшей оптимизации работы лазерного батиметрического обнаружителя размещенных на дне объектов.

Общая схема проведения батиметрического обнаружения малых донных объектов с использованием лазерных излучателей на борту беспилотного летательного аппарата

General schematic of bathymetric detection of small seabed items using laser emitters onboard UAVs

Схема проведения лазерных измерений с использованием низколетящего БПЛА, на борту которого установлен лазерный излучатель, показана на рис. 1.

Как было сказано выше, считаем, что высота h_1 настолько низка, что для дальнейшего анализа различными атмосферными эффектами можно пренебречь. В этом случае задача обнаружения подводного объекта в основном может быть решена путем уверенной регистрации разницы ΔP между сигналами, отраженными от дна моря (P_1) и от подводного искомого предмета (P_2). Таким образом, требуется выполнение следующего условия:

$$\frac{\Delta P}{\sigma_{\Sigma}} = \frac{|P_1 - P_2|}{\sigma_{\Sigma}} \geq \chi, \quad (1)$$

где σ_{Σ} – суммарные шумы в системе; χ – пороговая величина отношения сигнал/шум, когда обеспечивается уверенная регистрация сигнала.

Оптимизация порядка размещения складываемых на дне объектов для достижения их минимальной внешней обнаруживаемости

Optimization of procedure for stacking items on seabed for their minimum external detectability

Проанализируем такой порядок размещения складываемых объектов, при котором батиметрическая аппаратура, используемая для их обнаружения, выдавала бы минимальный сигнал на выходе.

Прежде всего рассмотрим принцип работы самого лазерного батиметрического измерителя. Согласно [2–4], для оценки величины сигнала при проведении подобных измерений должны быть учтены такие показатели, как выходная мощность лазера P_0 , коэффициент суммарных потерь оптической системы η ; площадь апертуры приемника A_r ; высота полета БПЛА h_1 ; коэффициент рефракции воды η_w ; коэффициент отражения Френеля на границе воздух – вода ρ_w ; длина пути прохождения луча под водой h_2 ; коэффициент ослабления воды k ; коэффициент отражения дна ρ_b .

Сигнал, отраженный от дна, согласно [3, 4] определяется при $\tau_a = 0$ как

$$P_{b1} = P_0 A_r \eta (1 - \rho_w)^2 [\exp(-2h_2 k)] \frac{P_b}{\pi}, \quad (2)$$

В соответствии с (2) сигнал, отраженный от искомого донного объекта, определим как

$$P_{ob1} = P_0 A_r \eta (1 - \rho_w)^2 [\exp(-2h_3 k)] \frac{P_{ob}}{\pi}, \quad (3)$$

где ρ_{ob} – коэффициент отражения объекта.

В работе [5] было показано, что при малой глубине (< 13 м) формула (2) может быть записана как

$$P_{b2} = \frac{P_0 W \cdot \rho_b}{\pi} \exp(-2h_2 k). \quad (4)$$

Для сигнала, отраженного от донного предмета, по аналогии с (4) напишем

$$P_{ob2} = \frac{P_0 W \cdot \rho_{ob}}{\pi} \exp(-2h_3 k), \quad (5)$$

где ρ_{ob} – коэффициент отражения подводного объекта.

Вычислим отношение

$$\gamma = \frac{P_{ob2}}{P_{b2}}. \quad (6)$$

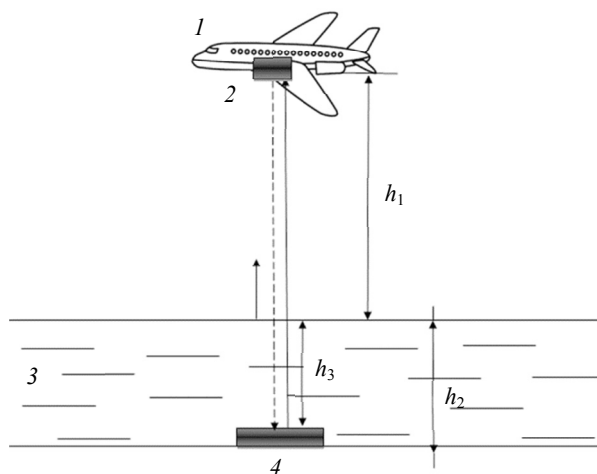


Рис. 1. Общая схема лазерных измерений с помощью низколетящего беспилотного летательного аппарата:

1 – беспилотный летательный аппарат; 2 – лазерный излучатель; 3 – водное пространство; 4 – подводный объект

Fig. 1. General schematic of laser measurements using low-flying unmanned aerial vehicles with a laser emitter on board: 1 – unmanned aerial vehicle; 2 – laser emitter; 3 – water area; 4 – underwater object

С учетом (4)–(6) имеем

$$\gamma = \frac{P_{ob}}{P_{ob}} \exp[-(2h_2 k - 2h_3 k)] = \frac{1}{\chi} \exp[2k \cdot h_{ob}], \quad (7)$$

где h_{ob} – высота объекта, определяемая как $h_{ob} = h_2 - h_3$; $\chi = \rho_{ob}/\rho_b$; χ – относительная величина, коэффициент отражения объекта.

Допустим, что имеется некоторое количество подводных объектов, показатель χ которых составляет упорядоченное множество (8):

$$\chi = \{\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_j, \dots, \chi_n\} \quad (8)$$

При этом

$$\chi_j = \chi_{j-1} + \Delta\chi; \quad j = \overline{1, n}; \quad \Delta\chi = \text{const.}$$

На основе (7) и (8) вычислим суммарный показатель $\sum_{j=1}^n \gamma_j$, обозначаемый далее как α .

Имеем:

$$\alpha = \sum_{j=1}^n \gamma_j = \sum_{j=1}^n \chi_j \cdot \exp[-2kh_{obj}]. \quad (9)$$

Введем на рассмотрение функцию связи

$$h_{obj} = \varphi(\chi_j). \quad (10)$$

Отметим, что функция (10) определяет желаемую искомую связь между h_{ob} и χ , при которой показатель γ имел бы экстремальную величину.

Для нахождения конкретного вида функции (10) сузим класс возможных рассматриваемых функций и потребуем выполнения следующего условия:

$$\sum_{j=1}^n \Phi(\chi_j) = C_1. \quad (11)$$

Выражения (9) и (11) в непрерывной форме могут быть представлены следующим образом:

$$\alpha = \int_0^{\chi_{\max}} \left(\frac{1}{\chi} \right) \cdot \exp[-2kh_{ob}(\chi)] d\chi. \quad (12)$$

$$\int_0^{\chi_{\max}} \varphi(\chi) d\chi = C_2; \quad C_2 = \text{const}. \quad (13)$$

С учетом (12) и (13) составим вариационную задачу оптимизации. Целевой функционал при этом будет иметь вид:

$$F = \int_0^{\chi_{\max}} \left(\frac{1}{\chi} \right) \cdot \exp[-2kh_{ob}(\chi)] d\chi + \lambda \left[\int_0^{\chi_{\max}} (\chi) d\chi - C_2 \right]. \quad (14)$$

Согласно [6] решение задачи (14) должно удовлетворять условию:

$$\frac{d \left\{ \left(\frac{1}{\chi} \right) \cdot \exp[-2kh_{ob}(\chi)] + \lambda \cdot h_{ob}(\chi) \right\}}{dh_{ob}(\chi)} = 0. \quad (15)$$

Из условия (15) получаем:

$$\frac{-2k}{\chi} \cdot \exp[-2kh_{ob}(\chi)] + \lambda = 0. \quad (16)$$

Из (16) находим

$$\exp[-2kh_{ob}(\chi)] = \frac{\lambda \cdot \chi}{2k}. \quad (17)$$

Из (17) получим

$$-2kh_{ob}(\chi) = \ln \frac{\lambda \cdot \chi}{2k} \quad (18)$$

или

$$h_{ob}(\chi) = \frac{1}{2k} \ln \frac{\lambda \cdot \chi}{2k}. \quad (19)$$

С учетом (13) и (19) может быть вычислено значение λ , величина которого обозначается далее как λ_0 .

С учетом (12) и (19) получим

$$\alpha_{extr} = \int_0^{\chi_{\max}} \frac{1}{\chi} \exp \left[-\ln \frac{2k}{\lambda_0 \chi} \right] d\chi = \int_0^{\chi_{\max}} \frac{1}{2k} d\chi = \frac{\lambda_0 (\chi_{\max} - 1)}{2k}. \quad (20)$$

При этом средняя величина α_{cp} будет равна

$$\alpha_{cp} = \frac{\lambda_0}{2k}. \quad (21)$$

Покажем, что эта величина отлична от единицы. С учетом (13) и (19) имеем

$$\frac{1}{2k} \int_0^{\chi_{\max}} \frac{2k}{\lambda \cdot \chi} d\chi = C_2. \quad (22)$$

Как видно из (22), значение λ зависит от значения C_2 , и всегда имеется возможность выбора такой величины C_2 , при которой $\alpha_{cp} \neq 1$.

Следует отметить, что решение (19) обеспечивает минимум целевого функционала (14). В этом можно убедиться, взяв повторную производную интегранта в (14) по искомой функции, результат которой будет положительной величиной. Это означает, что если обеспечить выполнение условия (19), то можно добиться максимальной внешней незаметности размещенных на дне объектов.

Пример практического применения полученных результатов

Example of practical implementation

Рассмотрим случай, когда на морском дне установлен объект в виде «подводной горы». Схема соответствующего батиметрического обнаружения показана на рис. 2.

В рассматриваемом случае исследуется искусственная подводная возвышенность, высота которой (h_b) изменяется по ходу полета. Также по ходу полета изменяется коэффициент отражения поверхности подводной возвышенности.

В данном случае весь вышеприведенный анализ остается в силе при условии замены P_{ob} на $P_{воз}$, где $P_{воз}$ – сигнал, отраженный от поверхности возвышенности; а также ρ_{ob} на $\rho_{воз}$, $\rho_{воз}$ – коэффициент отражения поверхности возвышенности.

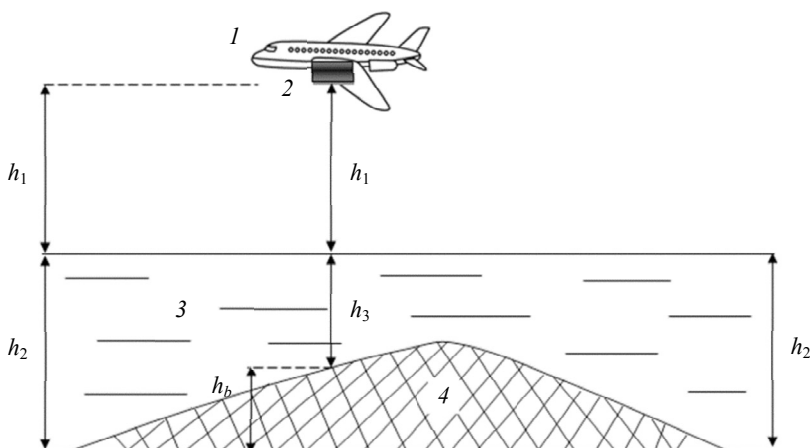
При этом параметры γ и χ будут определены как

$$\gamma = \frac{P_{воз}}{P_{b2}}, \quad (23)$$

Рис. 2. Общая схема батиметрического обнаружения подводного объекта:

1 – беспилотный летательный аппарат;
2 – лазерный измеритель;
3 – морская вода;
4 – подводный объект типа возвышенности

Fig. 2. General schematic of bathymetric detection of underwater object:
1 – unmanned aerial vehicle;
2 – laser emitter;
3 – sea water;
4 – underwater feature of high ground type



где P_2 – сигнал от участка дна, где отсутствует возвышенность.

$$\chi = \frac{\rho_{\text{воз}}}{\rho_b} \quad (24)$$

Высота возвышенности h_b определится как

$$h_b = h_2 - h_3 \quad (25)$$

В этом случае ранее полученный результат в виде

$$h_{\text{воз}}(\chi) = \frac{1}{2k} \ln \frac{2k}{\lambda_0 \chi} \quad (26)$$

можно переписать как

$$\frac{\rho_{\text{воз}}}{\rho_b} = \frac{2k}{\lambda_0 \chi} \cdot \exp(-2h_{\text{воз}} k) \quad (27)$$

Следовательно, если $h_{\text{воз}}$ и $\rho_{\text{воз}}$ изменяются парафазно (т.е. рост $\rho_{\text{воз}}$ приводит к уменьшению $h_{\text{воз}}$, и наоборот, уменьшение $\rho_{\text{воз}}$ сопровождается увеличением $h_{\text{воз}}$) то на вход приемника поступит минимальный сигнал, что является желаемым в данном случае для обеспечения минимальной обнаруживаемости донных объектов.

Заключение

Conclusion

Предложен метод обеспечения минимальной обнаруживаемости установленных на дне складываемых объектов. Определен порядок складирования различных объектов на дне, при котором обеспечивается их скрытность для батиметрического обнаружителя донных объектов с использованием лазерного источника, установленного на БПЛА.

Показано, что среднеинтегральная величина относительной величины сигнала, отраженного от донных объектов, будет иметь минимум при обеспечении обратной логарифмической зависимости высоты обнаруживаемых объектов от отношения коэффициентов отражения объекта и дна.

Список использованной литературы

1. Carr D.A. Study of the target detection capabilities of an airborne LIDAR bathymetry system : master thesis. [Atlanta] : Georgia Institute of Technology, 2013. XVIII, 133 p.
2. Philpot W. Airborne laser hydrography II. [S. l.], 2019. VIII, 279 p. DOI: 10.7298/jxm9-g971.
3. Prediction of bathymetric lidar performance with Ocean Scientific 2001 simulation code / V.I. Feigels, B. Evans, L. Feigels [et al.] // Ocean Optics: Remote Sensing and Underwater Imaging. Bellingham, 2002. P. 61–70. (SPIE proceedings series ; 4488). DOI: 10.1117/12.452826.
4. Gunther G.C. Airborne Laser Hydrography: System design and performance factors. Rockville, 1985. XIII, 385 p. (NOAA Professional Paper Series). URL: <http://shoals.sam.usace.army.mil/downloads/Publications/AirborneLidarHydrography.pdf> (Accessed: 31.03.2022).
5. Wang C.K., Philpot W.D. Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters // Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 106, № 1. P. 123–135. DOI: 10.106/j.rse.2006.08.003.
6. Элсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. Москва : Наука, 1974. 432 с.

References

1. Carr D.A. Study of the target detection capabilities of an airborne LIDAR bathymetry system : master thesis. [Atlanta] : Georgia Institute of Technology, 2013. XVIII, 133 p.

2. *Philpot W.* Airborne laser hydrography II. [S. 1.], 2019. VIII, 279 p. DOI: 10.7298/jxm9-g971.
3. Prediction of bathymetric lidar performance with Ocean Scientific 2001 simulation code / *V.I. Feigels, B. Evans, L. Feygels* [et al.] // *Ocean Optics: Remote Sensing and Underwater Imaging*. Bellingham, 2002. P. 61–70 (SPIE proceedings series; 4488). DOI: 10.1117/12.452826.
4. *Guenther G.C.* Airborne Laser Hydrography: System design and performance factors. Rockville, 1985. XIII, 385 p. (NOAA Professional Paper Series). URL: <http://shoals.sam.usace.army.mil/downloads/Publications/AirborneLidarHydrography.pdf> (Accessed: 31.03.2022).
5. *Wang C.K., Philpot W.D.* Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters // *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 106, no. 1. P. 123–135. DOI: 10.106/j.rse.2006.08.003.
6. *Elsgolts L.E.* Differential equations and variational calculation. Moscow, Nauka, 1974. 432 p. (*in Russian*).

Сведения об авторах

Гаджиев Агагусейн Айдын оглы, аспирант Института водных проблем, инженер ООО Hasmatik. Адрес: AZ 1000, Азербайджанская Республика, Баку, пр. Нефтяников, д. 52. E-mail: haciyev.agahuseyn@gmail.com.

Эминов Рамиз Ахмед оглы, к.т.н., доцент Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности. Адрес: AZ 1010, Азербайджанская Республика, Баку, пр. Азадлыг, д. 20. E-mail: eminovramiz@mail.ru.

Асадов Хикмет Гамид оглы, д.т.н., профессор, начальник отдела НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства. Адрес: AZ 1145, Азербайджанская Республика, Баку, ул. Ахундова, стр. 1. E-mail: asadzade@rambler.ru.

About the authors

Agagusein Aidyn ogly Gadzhiev, Post graduate student, Research Institute of Water Problems, Engineer of ООО Hasmatik. Address: 52, pr. Neftyanikov, Baku, AZ 1000, Republic of Azerbaijan. E-mail: haciyev.agahuseyn@gmail.com.

Ramiz Akhmed ogly Eminov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Azerbaijan State Oil and Industry University. Address: 20, Azyldyg, Baku, AZ 1010. E-mail: eminovramiz@mail.ru.

Khikme Gamid ogly Asadov, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Azerbaijan State Oil and Industry University. Address: 20, Azyldyg, Baku; Professor, Head of Department, Aerospace Informatics Research Agency. Address: bldg. 1, ul. Akhundova, Baku, AZ 1145, Republic of Azerbaijan. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Поступила / Received: 27.01.22

Принята в печать / Accepted: 06.05.22

© Гаджиев А.А., Эминов Р.А., Асадов Х.Г., 2022