

УДК 551.46.08:551.501.816
EDN: CJQAJU

Б.Р. Джаббарлы

Национальное аэрокосмическое агентство, Баку, Азербайджанская Республика

БАТИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБИДНОСТИ ВОД В ВОДОЕМАХ

Объект и цель научной работы. Исследование степени загрязнения водоемов лазерным лучом должно быть осуществлено в нескольких точках и, в частном случае, по направлению движения носителя лидара на борту. Одноточечные измерения могут дать недостоверный результат в силу зависимости от погодных условий, взволнованности водной среды и ее затухания при исследовании лазерным лучом, а также других причин.

Составлена задача оптимизации маршрутных экологических батиметрических измерений на водоемах. Цель – нахождение такой оптимальной взаимосвязи функций зависимости мощности исходного сигнала, коэффициента ослабления и глубины водоема от пройденного пути, при которой можно достичь экстремального объема информации в процессе батиметрических измерений по маршруту.

Материалы и методы. С учетом экспоненциальной зависимости сигнала батометра от глубины водоема, затухания луча лазера и линейной зависимости от коэффициента объемного рассеяния оптимизирована процедура маршрутных измерений над водоемом, когда все эти три показателя оказываются зависимыми от геометрического показателя точки проведения измерений. Оптимизация осуществлена методом безусловной вариационной оптимизации.

Основные результаты. Проанализированы оптимальные попарные соотношения указанных показателей при условии постоянства третьего показателя по маршруту. Показано, что полученные соотношения экстремального режима обеспечивают не максимум, а минимум соответствующих целевых функционалов. Дано заключение о том, что на практике указанных соотношений показателей следует максимально избегать.

Заключение. Полученные результаты позволяют выбрать такое соотношение основных показателей проводимых батиметрических измерений, при котором исключается случай достижения минимальной информативности результатов измерений. Таким образом, определена четкая грань выбора взаимосвязанных показателей проводимых батиметрических измерений.

Ключевые слова: батиметрия, оптимизация, затухание, рассеяние, маршрутные измерения.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 551.46.08:551.501.816
EDN: CJQAJU

B.R. Jabbarli

National Aerospace Agency of Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan

BATYMETRIC METHOD OF WATER TURBIDITY SURVEYS

Object and purpose of research. Laser-based turbidity surveys of water areas must be carried out at several points and, in a particular case, co-directionally with the trajectory of instrumentation lidar movement because single-point results might be unreliable due to, e.g., bad weather or strong waves, or due to high instability of such water properties as laser decay, etc. The purpose of this study was to work out optimal routes for environmental bathymetric measurements at water bodies, so as to find an optimal balance between initial signal power, decay coefficient and water depth per unit distance that would offer the greatest scope of bathymetric data gathered along the way.

Materials and methods. Bathymetric signal in water changes exponentially with depth, whereas laser beam tends to decay linearly. Keeping all this in mind, this paper suggests an optimized procedure of measurement routes along the water

Для цитирования: Джаббарлы Б.Р. Батиметрический метод исследования турбидности вод в водоемах. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 1(407): 141–146.

For citations: Jabbarli B.R. Batymetric method of water turbidity surveys. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 1(407): 141–146 (in Russian).

body, when these three parameters become dependent on geometric characteristic of measurement point. The optimization was performed as per the method of unconditional variational optimization.

Main results. The study analyses optimal combinations between the couples of these parameters, the third one remaining constant all along the way. It is shown that obtained extreme combinations ensure not the maximum but the minimum of corresponding target functions. Therefore, in practice these extreme combinations must be thoroughly avoided.

Conclusion. The results of this study make it possible to select a combination of main parameters for bathymetric surveys that keeps measurement results informative. Therefore, this paper clearly explains how to select interconnected combinations of these parameters during bathymetric measurements.

Keywords: bathymetry, optimization, decay, dissipation, route measurements.

The author declares no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Хорошо известно, что неглубокие водоемы могут быть исследованы на предмет изучения степени их загрязненности с применением методов батиметрии, используя лидары, установленные на летательных средствах [1, 2]. Физически лазерный луч, направленный на толщу воды, подвергается отражению, рассеянию и постепенному ослаблению по интенсивности. При этом степень ослабления луча напрямую зависит от уровня загрязненности воды [3].

С экологической точки зрения, исследование степени загрязнения водоемов должно быть осуществлено в нескольких точках и, в частном случае, по направлению движения носителя лидара на борту. Одноточечные измерения могут дать недостоверный результат по нескольким причинам: зависимость от погодных условий, взволнованность водной среды, связность таких показателей водной среды, исследуемой лазерным лучом, как затухание, обратное рассеяние, коэффициенты поглощения и рассеяния [4, 5].

В работе [6] показано, что приемный сигнал в лазерной батиметрии может быть аппроксимирован экспоненциальной функцией. Вместе с тем экс-

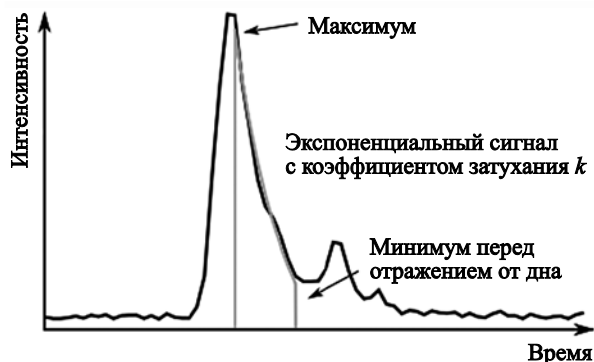


Рис. 1. Графическое отображение функции (1)

Fig. 1. Plot of function (1)

поненциальная аппроксимация не может отразить отражение от дна водоема, искажение данных о загрязненности водоема из-за воздействия шумов, распространение лазерного луча под углом, а не в перпендикулярном направлении к поверхности водоема и другие эффекты.

В общем случае форма батиметрического сигнала, полученного при исследовании водоемов лазерным лучом, формируется в результате взаимодействия луча с водной поверхностью, водной колонной и дном водоема [6, 7]. Из работ [8, 9] следует, что коэффициент объемного экспоненциального затухания характеризует объемный коэффициент абсорбции, а также диффузный коэффициент ослабления.

Как показано в работах [10, 11], обратное рассеяние лазерного луча в водной колонне может быть аппроксимировано экспонентой. В работе [12] предложено следующее выражение для вычисления сигнала обратного объемного рассеяния:

$$f(x) = b \cdot \exp(-kx), \quad (1)$$

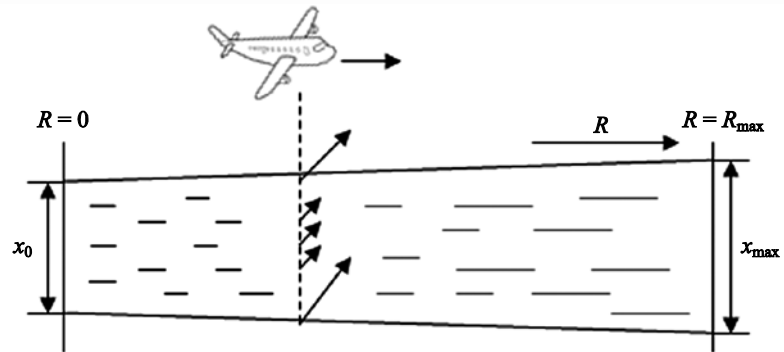
где x – глубина водоема; b – коэффициент обратного рассеяния; k – коэффициент объемного экспоненциального затухания.

На рис. 1 приведено графическое отображение сигнала, аппроксимированного выражением (1).

Как отмечено выше, с экологической точки зрения проводимые мониторинговые измерения должны быть многомерными в геометрическом смысле, т.е. содержать измерительные данные по нескольким координатным направлениям. В предлагаемом методе маршрутных батиметрических измерений (рис. 2) по мере движения носителя лидара по направлению R сигнал $f(x)$, получаемый на борту, неявным образом отображает такие данные, как $b = b_{BS}(R)$; $K = k(R)$; $x = x(R)$, где $b(R)$ – функция изменения сигнала обратного рассеяния по маршруту передвижения носителя; $k(R)$ – изменение затухания по маршруту; $x(R)$ – изменение глубины водоема по маршруту.

Рис. 2. Метод маршрутных батиметрических измерений

Fig. 2. Method of route bathymetric measurements



Целью проводимого исследования является определение взаимных соотношений функций $b(R)$, $k(R)$, $x(R)$, при которых информативность результатов проводимых измерений достигает экстремальной величины.

Материалы и методы

Materials and methods

Исследуем экстремальный режим батиметрических маршрутных измерений на геометрическом промежутке $R = 0 - R_{\max}$. Целью является определение парных соотношений между $k(R)$, $b(R)$ и $x(R)$, а также между $x(R)$ и $k(R)$ при постоянстве третьей функции, рассматриваемой в каждой из вышеуказанных задач в качестве постоянной величины.

Рассмотрим задачу вычисления оптимального соотношения между $k(R)$ и $b_{BS}(R)$ при $x(R) = \text{const}$. Применительно к функции $k(R)$ примем следующее ограничительное условие

$$\int_0^{R_{\max}} k(R) dR = C_1; \quad C_1 = \text{const}. \quad (2)$$

Геометрическая интерпретация условия (2) приведена на рис. 3.

На базе (1) с учетом вышеприведенных допущений сформируем следующий функционал:

$$F_{11} = \int_0^{R_{\max}} b(R) \exp[-k(R)x] dR. \quad (3)$$

С учетом выражений (2) и (3) сформируем вариационную оптимизационную задачу, целевой функционал которой имеет вид:

$$F_{12} = \int_0^{R_{\max}} b(R) \exp[-k(R)x] dR + \lambda \left[\int_0^{R_{\max}} k(R) dR - C_1 \right], \quad (4)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Согласно уравнению Эйлера, решение задачи (4) может быть вычислено по условию

$$\frac{d\{b(R) \exp[-k(R)x] + \lambda k(R)\}}{dk(R)} = 0. \quad (5)$$

Из условия (5) получаем:

$$-b(R) \exp[-k(R)x] x + \lambda = 0. \quad (6)$$

Из (6) находим

$$\exp[-k(R)x] = \frac{\lambda}{b(R)x}. \quad (7)$$

Из (7) получаем

$$k(R) = \frac{1}{x} \ln \frac{b(R)x}{\lambda}. \quad (8)$$

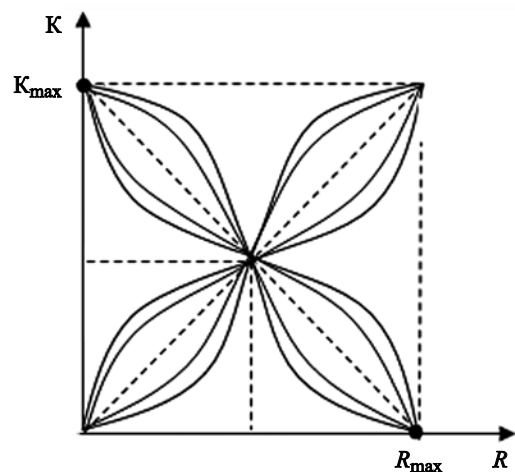


Рис. 3. Геометрическая интерпретация условия ограничения (2)

Fig. 3. Geometric interpretation for Restriction (2)

С учетом (2) и (8) имеем

$$\frac{1}{x} \int_0^{R_{\max}} \ln \frac{b(R)x}{\lambda} dR = C_1. \quad (9)$$

Из (9) находим

$$\frac{1}{x} \int_0^{R_{\max}} \ln b(R)x dR - \frac{[\ln \lambda] R_{\max}}{x} = C_1. \quad (10)$$

Из (10) получаем

$$\ln \lambda = \frac{1}{R_{\max}} \int_0^{R_{\max}} \ln b(R)x dR - \frac{C_1 x}{R_{\max}}. \quad (11)$$

Из (11) окончательно получаем

$$\lambda = \exp \left[\frac{1}{R_{\max}} \int_0^{R_{\max}} \ln b(R)x dR - C_1 x \right]. \quad (12)$$

С учетом (8) и (12) получим

$$k(R) = \frac{1}{x} \ln \frac{b(R)x}{\exp \left[\frac{1}{R_{\max}} \int_0^{R_{\max}} \ln b(R)x dR - C_1 x \right]}. \quad (13)$$

Следовательно, при условии $x = \text{const}$ логарифмическая зависимость между $k(R)$ и $b(R)$ может обеспечить экстремальный режим проводимых батиметрических измерений. Однако при этом целевой функционал F_{12} достигает минимума, т.к. вторая производная γ интегранта в (4) в виде

$$\gamma = \frac{d^2 \{b(R) \exp[-k(R)x] + \lambda k(R)\}}{dk(R)^2}.$$

всегда оказывается положительной величиной.

Следовательно, в рассматриваемом режиме экологических батиметрических измерений следует избегать логарифмического соотношения между $k(R)$ и $b(R)$ в виде (13).

Отметим, что симметричность формулы (1) относительно k и x позволяет нам без подобного вышеприведенного анализа определить целевой функционал задачи определения оптимального соотношения между $k(R)$ и $b(R)$ при $k = \text{const}$ в следующем виде:

$$F_{21} = \int_0^{R_{\max}} x(R) dR = C_2, \quad (14)$$

$$F_{22} = \int_0^{R_{\max}} b(R) \exp[-kx(R)] dR + \lambda \left[\int_0^{R_{\max}} x(R) dR - C_2 \right]. \quad (15)$$

Решение (15) будет иметь вид:

$$x(R) = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{b(R)k}{\exp \left[\frac{1}{R_{\max}} \int_0^{R_{\max}} \ln b(R)k dR - C_2 x \right]}. \quad (16)$$

При решении (16) функционал (15) также будет достигать минимума. Следовательно, при осуществлении маршрутных батиметрических измерений подобного рода также следует избегать зависимости логарифмического вида типа (16).

Рассмотрим задачу вычисления оптимального соотношения между $k(R)$ и $x(R)$ при $b = \text{const}$. При условии

$$\int_0^{R_{\max}} x(R) dR = C_3; \quad C_3 = \text{const} \quad (17)$$

целевой функционал F_3 запишем в виде

$$F_3 = \int_0^{R_{\max}} b(R) \exp[-kx(R)] dR + \lambda \left[\int_0^{R_{\max}} x(R) dR - C_3 \right]. \quad (18)$$

Решение (18) по условию уравнения Эйлера дает

$$-bk(R) \exp[-k(R) \cdot x(R)] + \lambda = 0. \quad (19)$$

Из (19) имеем

$$\exp[-k(R) \cdot x(R)] = \frac{\lambda}{bk(R)}. \quad (20)$$

Из (20) находим

$$-k(R) \cdot x(R) = \ln \frac{\lambda}{bk(R)}. \quad (21)$$

Из (21) получим

$$x(R) = \frac{1}{k(R)} \cdot \ln \left[\frac{\lambda}{bk(R)} \right]. \quad (22)$$

Вычислим λ .

С учетом (17) и (22) получим

$$\int_0^{R_{\max}} b(R) \exp[-kx(R)] dR. \quad (23)$$

Из (23) находим

$$\int_0^{R_{\max}} \frac{1}{k(R)} \ln[bk(R)] dR - \int_0^{R_{\max}} \frac{\ln \lambda}{k(R)} dR = C_3. \quad (24)$$

Из (24) имеем

$$\ln \lambda \int_0^{R_{\max}} \frac{dR}{k(R)} = \int_0^{R_{\max}} \frac{1}{k(R)} \ln[bk(R)] dR - C_3. \quad (25)$$

Из (25) получим

$$\lambda = \exp \left[\frac{\int_0^{R_{\max}} \frac{1}{k(R)} \ln[bk(R)] dR - C_3}{\int_0^{R_{\max}} \frac{dR}{k(R)}} \right]. \quad (26)$$

Как видно из вышеприведенного решения, при условиях (22) и (26) функционал (18) также достигает минимума. Следовательно, при проведении аналогичных батиметрических измерений условия (22) следует избегать.

Отметим, что из-за симметричности в отношении k и x , приняв условие

$$\int_0^{R_{\max}} k(R) dR = C_4; \quad C_4 = \text{const},$$

можно составить целевой функционал

$$F_3 = \int_0^{R_{\max}} b \exp[-k(R)x(R)] dR + \lambda \left[\int_0^{R_{\max}} k(R) dR - C_4 \right] \quad (27)$$

и аналогично (22) и (26) записать решение (27)

$$k(R) = \frac{1}{x(R)} \cdot \ln \frac{bx(R)}{\lambda}, \quad (28)$$

$$\lambda = \exp \left[\frac{\int_0^{R_{\max}} \ln \frac{bx(R)}{x(R)} dR - C_4}{\int_0^{R_{\max}} \frac{dR}{x(R)}} \right]. \quad (29)$$

Заключение

Conclusion

Сформулирована и решена задача оптимизации маршрутных экологических батиметрических измерений. В качестве основы взято известное выражение экспоненциальной зависимости сигнала батометра от глубины водоема, затухания луча лазера и линейной зависимости от коэффициента объемного рассеяния.

Рассмотрен случай маршрутных измерений над водоемом, когда все эти три показателя оказываются зависимыми от геометрического показателя точки проведения измерений. Проанализированы

оптимальные попарные соотношения этих показателей при условии постоянства третьего показателя по маршруту. Показано, что полученные оптимальные соотношения обеспечивают не максимум, а минимум соответствующих целевых функционалов. Поэтому на практике следует избегать указанных соотношений.

Список использованной литературы References

1. Mandlbürger G. A review of airborne laser bathymetry for mapping of inland and coastal waters // Hydrographische Nachrichten. 2020. Vol. 116, № 6. P. 6–15. DOI: 10.23784/HN116-01.
2. Churnside J.H. Review of profiling oceanographic lidar // Optical Engineering. 2014. Vol. 53 № 5. P. 051405 (13 p.). DOI: 10.1117/1.OE.53.5.051405.
3. Walker R.E., McLean J.W. Lidar equations for turbid media with pulse stretching // Applied Optics. 1999. Vol. 38, № 12. P. 2384–2397. DOI: 10.1364/AO.38.002384.
4. Phillips D.M., Abbot R.H., Penny M.F. Remote sensing of sea water turbidity with an airborne laser system // Journal of physics D: applied physics. 1984. Vol. 17, № 8. P. 1749–1758. DOI: 10.1088/0022-3727/17/8/028.
5. Billard B., Abbot R.H., Penny M.F. Airborne estimation of sea turbidity parameters from the WRELADS laser airborne depth sounder // Applied optics. 1986. Vol. 25, № 13. P. 2080–2088. DOI: 10.1364/ao.25.002080.
6. Wa-LiD: A new LiDAR simulator for waters / H. Abdallah, N. Baghdadi, J.S. Bailly, Y. Pastol, F. Fabre // IEEE geoscience and remote sensing letters. 2012. Vol. 9, № 4. P. 744–748. DOI: 10.1109/LGRS.2011.2180506.
7. Pfeifer N., Mandlbürger G., Glira P. Laserscanning // Handbuch der Geodäsie. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2016. S. 1–51. (Springer Reference Naturwissenschaften).
8. Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry / G.C. Guenther, A.G. Cunningham, P.E. LaRocque, D.J. Reid // Proceedings of 20th EARSeL Symposium: Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea. Paris : EARSEL, 2001. Vol. 1. P. 1–27.
9. Gordon H.R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering // Applied Optics. 1982. Vol. 21, № 16. P. 2996–3001.
10. Potential of non-linear full-waveform stacking technique in airborne LiDAR bathymetry / D. Mader, K. Richter, P. Westfeld, H.G. Maas // PFG. Journal of Photogram-

- metry, remote sensing and geoinformation science. 2021. Vol. 89, № 2. P. 139–158. DOI: 10.1007/s41064-021-00147-y.
11. Detection and extraction of water bottom topography from laserbathymetry data by using full-waveform-stacking techniques / *D. Mader, K. Richter, P. Westfeld* [et al.] // International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. 2019. Vol. XLII-2/W13. P. 1053–1059. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1053-2019.
12. Water turbidity estimation from lidar bathymetry data by full-waveform analysis comparison of two approaches / *D. Mader, K. Richter, P. Westfeld, H.G. Maas* // International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. 2021. Vol. XLIII-B2-

2021. P. 681–688. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-681-2021.

Сведения об авторе

Джаббарлы Бибиханым Раваят гызы, старший научный сотрудник Национального Аэрокосмического Агентства Азербайджана. Адрес: Азербайджанская Республика, г. Баку, ул. С. Ахундова, 1. E-mail: jabbarly_br@nasa.az.

About the author

Bibihanym R. Jabbarli, Senior Research Scientist of National Aerospace Agency of Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan. Address: 1, S. Akhundov st., Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: jabbarly_br@nasa.az.

Поступила / Received: 26.10.23
Принята в печать / Accepted: 05.03.24
© Джаббарлы Б.Р., 2024