РАДИОТЕХНИКА, РАДИОЛОКАЦИЯ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

УДК 621.371

ВЕРТИКАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДВОДНЫЙ БЕСПРОВОДНОЙ ОПТИЧЕСКИЙ КАНАЛ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Л. В. Аронов, к.т.н., доцент кафедры РУС РГРТУ, Рязань, Россия; orcid.org/0000-0001-9010-3836, e-mail: LVArronov@yandex.ru

Рассмотрен вопрос передачи потока видеоданных в реальном масштабе времени. Целью работы был анализ вертикальных профилей фитопланктона и учёт их влияния на энергетический бюджет вертикально-ориентированного подводного беспроводного оптического канала связи. В результате работы были получены вертикальные профили суммарного ослабления для воды с поверхностной замутнённостью 0,4 мг/м³ и 3 мг/м³. Величина ослабления при этом на глубине с максимальной концентрацией фитопланктона различается в 6 раз. Моделирование показало, что при использовании в качестве оптического передатчика лазерного светодиода NDB4116 мощностью излучения 100 мВт, глубина, на которой принятая мощность опускается ниже предельной чувствительности фотоприёмника, составляет от 12 до 70 метров при заданной замутнённости. При этом использование модуляции КИМ-ИМ позволяет обеспечить передачу потока видеоданных со скоростью 4 Мбит/с на глубину от 9 до 39 метров.

Ключевые слова: подводный оптический канал передачи информации, оптическая связь, беспроводной оптический канал, подводная связь, оптические линии связи.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-86-3-10

Введение

Одной из задач, решаемых подводными беспилотными аппаратами, является задача мониторинга состояния подводных инженерных коммуникаций и проведения регламентных и иных работ. К таковым относятся газо- и нефтепроводы, инфраструктура, сопутствующая добыче полезных ископаемых, подводные линии связи и электропередачи. Обследованию при этом подлежат не только непосредственно элементы инженерных коммуникаций, но и прилегающая к нему окрестность морского дна. Особенно актуальна данная задача для инфраструктуры, расположенной на небольших глубинах, где возрастает вероятность случайного или преднамеренного повреждения.

Проведение мониторинга осуществляется путём визуального осмотра, при этом, с одной стороны, для управления автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) достаточно низкоскоростного канала управления, в роли которого может выступать гидроакустический канал, с другой – на «базу» передаётся видеоизображение высокой чёткости, что требует уже высокоскоростного способа передачи данных. Реализовать это практически можно, используя либо проводной канал передачи данных, либо подводный беспроводной оптический канал связи (ПБОКС) [1]. При этом ПБОКС может быть как основным, так и дублирующим каналом по отношению к проводному. Использование беспроводного канала имеет ряд достоинств, в частности отсутствует парусность, создаваемая кабелем связи, что позволяет уменьшить габариты АНПА и увеличить его манёвренность.

Однако следует отметить, что основной источник ослабления в ПБОКС – фитопланктон распределен неравномерно и его концентрация зависит от глубины погружения [2]. Следовательно, коэффициент ослабления нельзя принять за константу и необходимо учитывать его изменение в соответствии с изменением концентрации фитопланктона в вертикальном профиле океана в данной области.

Цель работы

Целью работы являются анализ вертикальных профилей фитопланктона и учёт их влияния на энергетический бюджет вертикально-ориентированного подводного беспроводного оптического канала связи.

Теоретическая часть

Расчет коэффициента затухания производится с использованием однопараметрической модели, основанной на измерении концентрации хлорофилла. Данный параметр коррелирует не только с концентрацией фитопланктона, но и с концентрацией иных компонент, влияющих на степень ослабления оптического сигнала в морской воде, которое обусловлено одновременно рассеянием и поглощением, то есть с физической точки зрения имеет место распространение света в мутной среде. Обобщенная процедура расчета ослабления излучения оптического диапазона в морской воде показана на рисунке 1 [3].



Рисунок 1 – Процедура расчета коэффициента ослабления Figure 1 – Attenuation coefficient calculating procedure

Данная процедура учитывает рассеяние и поглощение на молекулах воды, которые не зависят от концентрации органических и минеральных взвесей. Средние значения соответствующих коэффициентов измерены во всем видимом диапазоне длин волн [4]. Суммарный коэффициент ослабления $c(\lambda)$ на единицу длины, зависящий от длины волны λ , находится по формуле [5]:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda), \tag{1}$$

где $a(\lambda)$ – коэффициент поглощения на единицу длины, а $b(\lambda)$ – коэффициент рассеяния на единицу длины. Коэффициент поглощения рассчитывается по выражению [5]:

$$a(\lambda) = a_{w}(\lambda) + a_{Cl}(\lambda)C_{Cl}^{0.6} + a_{f}C_{f}e^{-k_{f}\lambda} + a_{h}C_{h}e^{-k_{h}\lambda}, \qquad (2)$$

где $a_w(\lambda)$ – коэффициент поглощения в чистой воде, m^{-1} ; $a_{Cl}(\lambda)$ – коэффициент поглощения хлорофилла, $m^{2}/_{M^3}$; $a_h(\lambda)$ – коэффициент поглощения гуминовых кислот, m^{-1} ; $a_f(\lambda)$ – коэффициент поглощения фульвиковых кислот, m^{-1} ; C_f – концентрация фульвиковой кислоты, $m^{2}/_{M^3}$; C_h – концентрация гуминовых кислот, $m^{2}/_{M^3}$; $a_f = 35,96m^2m^{-1}$ – коэффициент поглощения фульвиковой кислоты, $a_h = 18,8m^2m^{-1}$ – ко-

эффициент поглощения гуминовых кислот; $k_f = 0,019_{HM}^{-1}$ – постоянная затухания фульвиковых кислот и $k_h = 0,011_{HM}^{-1}$ – постоянная затухания гуминовых кислот.

Коэффициент рассеяния $b(\lambda)$ определяется по формуле:

$$b(\lambda) = b_w(\lambda) + b_s(\lambda)C_s + b_l(\lambda)C_l, \qquad (3)$$

где $b_w(\lambda)$ – коэффициент молекулярного рассеяния чистой воды, M^{-1} ; $b_s(\lambda)$ – коэффициент рассеяния на частицах диаметром менее 1 мкм, M^{-1} ; C_s – концентрация частиц диаметром менее 1 мкм, $M^{2}/_{M^3}$; $b_l(\lambda)$ – коэффициент рассеяния частиц диаметром более 1 мкм, M^{-1} ; C_l – концентрация частиц диаметром более 1 мкм, $M^{2}/_{M^3}$.

Здесь коэффициенты C_s и C_l – концентрации малых и больших частиц соответственно [6]:

$$C_{s} = 0,01739 \cdot C_{cl} \exp[0,11631 \cdot C_{cl}];$$

$$C_{l} = 0,76284 \cdot C_{cl} \exp[0,03092 \cdot C_{cl}].$$

Коэффициенты, содержащиеся в формулах (2) и (3), определяются на основе эмпирических формул, приведенных в работах [5-7].

После этого определяется мощность, принятая фотоприёмником и поступившая на чувствительную площадку фотодетектора, с учётом коэффициентов пропускания приёмной и передающей оптических систем и геометрических потерь:

$$P_{\Pi pM} = P_{\Pi p\mathcal{A}} \frac{D_{\Pi pM}^2}{\left(D_{\Pi p\mathcal{A}} + 2L_m \cdot tg\left(\theta_{div}\right)\right)^2} 10^{\left(\frac{-c_{ob}(\lambda)L_m}{10}\right)} \tau_{\Pi p\mathcal{A}} \tau_{\Pi pM} , \qquad (4)$$

где $P_{\Pi p \pi}$ – мощность излучения оптического передатчика, Вт; $D_{\Pi p M}$ – диаметр приемной апертуры, м; $D_{\Pi p \pi}$ – диаметр передающей апертуры, м; L_m – расстояние между приемником и передатчиком, м; θ_{div} – угол рассеяния лазерного излучения в морской воде, °; $c_{\partial E}(\lambda)$ – суммарный коэффициент ослабления, дБ/м; $\tau_{\Pi p \pi}$ – коэффициент передачи передающей оптической системы; $\tau_{\Pi p M}$ – коэффициент передачи приёмной оптической системы.

Формула (4) имеет смысл при неизменном коэффициенте затухания, однако в случае вертикальной направленности канала передачи данных нужно учитывать, что концентрация хлорофилла C_{Cl} в зависимости от глубины погружения z изменяется по закону [8]:

$$C_{Cl}(z) = B_0 + S \cdot z + \frac{h}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\left(z - z_{\max}\right)^2}{2\sigma^2}\right],$$
(5)

где B_0 – фоновая концентрация хлорофилла вблизи поверхности, $\frac{M^2}{M^3}$; S – вертикальный градиент концентрации $\frac{M^2}{M^4}$; h – общий хлорофилл над фоном, $\frac{M^2}{M^2}$; σ – стандартное отклонение гауссова закона распределения, определяющее толщину слоя с максимальной концентрацией хлорофилла, м; z_{max} – глубина, на которой концентрация хлорофилла максимальна, м. Графическая иллюстрация модели вертикального распределения хлорофилла по-казана на рисунке 2.

С учётом неравномерности вертикального распределения хлорофилла формула для расчёта поглощения примет вид:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{Cl}(\lambda)C_{Cl}(z)^{0.6} + a_fC_f e^{-k_f\lambda} + a_hC_h e^{-k_h\lambda},$$
(6)

где концентрации фульвиковых и гуминовых кислот определяются по эмпирическим формулам, приведенным в работе [6], с учётом переменной концентрации хлорофилла, зависящей от глубины погружения:

$$C_{f} = 1,74098 \cdot C_{Cl}(z) \cdot e^{0.12327 \cdot C_{Cl}(z)},\tag{7}$$

$$C_{h} = 1,9334 \cdot C_{Cl}(z) \cdot e^{0,12343 \cdot C_{Cl}(z)}.$$
(8)



Рисунок 2 – Модель вертикального распределения хлорофилла Figure 2 – Vertical distribution model of chlorophyll

Коэффициент рассеяния вычисляется по выражению (3), при этом формулы расчёта концентрации малых и больших частиц принимают вид:

$$C_{s} = 0,01739 \cdot C_{cl}(z) \exp\left[0,11631 \cdot C_{cl}(z)\right];$$

$$(9)$$

$$C_{l} = 0,76284 \cdot C_{cl}(z) \exp\left[0,03092 \cdot C_{cl}(z)\right].$$
 (10)

Таким образом, суммарный коэффициент ослабления $c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$ для вертикального канала является функцией двух переменных длины волны λ и концентрации хлорофилла $C_{cl}(z)$. зависящей от глубины погружения z. Причем концентрация хлорофилла зависит от глубины погружения, т.е. формулу (4), определяющую принятую мощность, можно переписать в виде:

$$P_{\Pi pM} = P_{\Pi p\mathcal{A}} \frac{D_{\Pi pM}^2}{\left(D_{\Pi p\mathcal{A}} + 2L_m \cdot tg\left(\theta_{div}\right)\right)^2} \tau_{\Pi p\mathcal{A}} \tau_{\Pi pM} \prod_{i=1}^N 10^{\left(\frac{-\frac{c_{\partial bi}\left(\lambda, z\right)\Delta L_m}{10}\right)},\tag{11}$$

где дистанция L_m разбита на N слоёв толщиной ΔL_m . В окончательном виде формула (12) выглядит как

$$P_{\Pi pM} = P_{\Pi p\Pi} \frac{D_{\Pi pM}^2}{\left(D_{\Pi p\Pi} + 2L_m \cdot tg\left(\theta_{div}\right)\right)^2} \tau_{\Pi p\Pi} \tau_{\Pi p\Pi} 10^{-\frac{\Delta L_m}{10} \sum_{i=1}^N c_{\partial bi}(\lambda, z)}.$$
(12)

Полученное выражение позволяет рассчитать мощность на выходе оптического приёмника в ПБОКС с вертикальной ориентацией с учётом изменения коэффициента ослабления в зависимости от глубины.

Результаты расчётов

Коэффициенты в формуле (5), описывающей вертикальное распределение хлорофилла, выбираются на основании эмпирических данных, полученных для конкретной географиче-

ской зоны Мирового океана в определённый сезон. Данные по вертикальным профилям океана содержатся в различных литературных источниках [8, 9], при этом следует учитывать, что речь идёт об усредненных статистических данных, так как на глубинах до 200 метров параметры океана непостоянны и зависят, в том числе, от погоды и времени суток [6]. В качестве параметров модели вертикального распределения хлорофилла возьмем параметры «зоны холодной воды» из работы [8], которая по описанию наиболее близка к водам северовосточного побережья Российской Федерации. Зависимость суммарного коэффициента ослабления, рассчитанного по формуле (1) с учётом формулы (5), показана на рисунке 3 для вод типов «чистый океан» (концентрация хлорофилла 0,4 мг/м³) и «прибрежные воды» (концентрация хлорофилла 3 мг/м³) [1].



Рисунок 3 – Суммарный коэффициент ослабления в зависимости от глубины на длине волны 445 нм Figure 3 – Total attenuation coefficient depending on depth at a wavelength of 445 nm

На построенном графике видно, что максимальное значение коэффициента ослабления у двух типов воды различается в 6 раз, однако на глубинах свыше 60 метров различия незначительны, так как концентрация хлорофилла на этой глубине мала из-за поглощения солнечных лучей в вышележащих слоях.

На основе полученных зависимостей произведен расчет мощности, принятой фотоприёмником, причем исходные данные взяты из работы [10], где в качестве фотодетектора выбран фотодиод S5973-02 с пиком чувствительности, равным $S_{\phi} = 0,35$ А/Вт на длине волны 450 нм, и темновым током $I_D = 0,1 \cdot 10^{-9}$ А, диаметром приёмной и передающей апертур 0,05 м. На передающей стороне установлен лазерный светодиод NDB4116 мощностью излучения $P_{\Pi p \pi} = 100$ мВт. Полученная зависимость показана на рисунке 4.

Из расчёта видно, что в случае концентрации хлорофилла в поверхностных водах 3 мг/м³ принятая мощность снижается до пороговой чувствительности 91 дБм на глубине 12 метров, в то время как для концентрации хлорофилла 0,4 мг/м³ эта глубина составит 70 метров. На основе полученных результатов, с использованием алгоритма, описанного в работе [10], были рассчитаны вероятности битовой ошибки (BER) для обоих случаев при использовании модуляции кодоимпульсной модуляции по интенсивности (КИМ-ИМ) (рисунок 5).

При допустимой вероятности ошибки 10^{-6} глубина, на которую возможно передать видеопоток стандартной чёткости со скоростью 4 Мбит/с с помощью ПБОКС, составит для воды типа «прибрежные воды» 9 метров, а для воды типа «чистый океан» – 39 метров. В случае уменьшения допустимого значения BER до 10^{-8} соответствующие глубины уменьшатся до 8 и 36 метров, причём основная часть энергии в мутной воде при принятых параметрах вертикального профиля хлорофилла теряется на глубине до 25 метров.



Рисунок 4 – Принятая мощность в зависимости от глубины Figure 4 – Received power depending on depth



Рисунок 5 – Вероятность битовой ошибки в зависимости от глубины Figure 5 – Bit error probability as a function of depth

Заключение

В настоящей статье был рассмотрен вертикально-ориентированный ПБОКС для передачи потоков видеоданных в реальном масштабе времени. Вертикальный профиль хлорофилла, который является определяющим с точки зрения однопараметрической модели ослабления оптического сигнала в морской воде, зависит от сезона и географического положения конкретной области Мирового океана.

Значительная часть энергии в вертикально-ориентированном канале теряется в окрестностях глубинной отметки, соответствующей максимальной концентрации хлорофилла. Таким образом, помимо стандартных способов увеличения дальности: увеличения мощности, использования помехоустойчивого кодирования, увеличения приёмной оптической апертуры и т.д., возможен технический приём с опусканием буя с оптическим приёмником на глубину ниже $z_{\rm max}$. Однако в этом случае возникает проблема стабилизации луча и точности наведения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

Библиографический список

1. Кириллов С.Н., Аронов Л.В. Определение характеристик подводного открытого оптического канала передачи информации на больших глубинах // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 63. С. 40-48.

2. Laura J. Johnson Underwater optical wireless communications: depth dependent variations in attenuation [Tekcr] / Laura J. Johnson, Roger J. Green, Mark S. Leeson // Applied Optics, volume 52 (no. 33). Pp. 7867-7873.

3. Аронов Л.В. Процедура расчета энергетического бюджета подводного открытого оптического канала передачи информации // Новые информационные технологии в научных исследованиях материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет. 2017. С. 84-86.

4. William M. Irvine Infrared optical properties of water and ice spheres [Tekct] / William M. Irvine, James B. Pollack // Icarus. 1968. No. 8. Pp. 324-360.

5. Kaushal H. Underwater optical wireless communication [Tekct] / H. Kaushal, G. Kaddoum // IEEE Access. 2016. Volume 4. Pp. 1518-1547.

6. Abd El-Naser A. Mohamed. Underwater wireless optical communications for short range typical ocean water types [TekcT] / Abd El-Naser A. Mohamed, Hamdy A. Sharshar, Ahmed Nabih Zaki Rashed, Enab Salah El-dien // Canadian journal on electrical and electronics engineering. 2012. No. 7, vol. 3. Pp. 344-361.

7. Кириллов С.Н., Балюк С.А., Кузнецов С. Н., Есенин А.С. Разработка модели распространения оптического сигнала в водной среде для подводных систем передачи информации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 40. С. 3-8.

8. Kameda T. Chlorophyll biomass off Sanriku, Northwestern Pacific, estimated by Ocean Color and Temperature Scanner (OCTS) and a vertical distribution model / T. Kameda, S. Matsumura // J. Oceanogr. 54, 509-516 (1998).

9. **Mosharov S.A.** Seasonal Variability of Plankton Production Parameters as the Basis for the Formation of Organic Matter Flow in the Southeastern Part of the Baltic Sea / S.A. Mosharov, I.V. Mosharova, O.A. Dmitrieva, A.S. Semenova, M.O. Ulyanova // Water 2022, 14, 4099. DOI: 10.3390/w14244099.

10. Кириллов С.Н., Аронов Л.В. Пропускная способность подводного оптического канала передачи информации с кодоимпульсной модуляцией по интенсивности // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 74. С. 3-13. DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-3-13.

UDC 621.371

VERTICALLY ORIENTED UNDERWATER WIRELESS OPTICAL TELECOMMUNICATION CHANNEL

L. V. Aronov, Ph.D. (in technical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0001-9010-3836, e-mail: LVArronov@yandex.ru

This article examines the issue of transmitting a video data stream in real time. **The aim of the work** is to analyze the vertical profiles of phytoplankton and take into account their impact on energy budget of vertically oriented underwater wireless optical communication channel. As a result of the work, vertical profiles of total attenuation have been obtained for water with surface turbidity of 0.4 mg/m3 and 3 mg/m3. The magnitude of the attenuation at the depth with maximum concentration of phytoplankton differs by 6 times. Simulation has shown that when using NDB4116 laser LED with a radiation power of 100 mW as an optical transmitter, the depth at which the received power falls below maximum photodetector sensitivity ranges from 12 to 70 meters at given turbidity. At the same time, the use of PCM allows the transmission of a video data stream at a speed of 4 Mbit/s to the depth of 9 to 39 meters.

Keywords: underwater optical wireless communication channel, optical wireless communication, free space optic, underwater communication, optical communication line.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-86-3-10

References

1. Kirillov S.N., Aronov L.V. Opredelenie harakteristik podvodnogo otkrytogo opticheskogo kanala peredachi informacii na bol'shih glubinah. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta*. 2018, no. 63, pp. 40-48. (in Russian).

2. Laura J. Johnson Underwater optical wireless communications: depth dependent variations in attenuation [Tekst] / Laura J. Johnson, Roger J. Green, Mark S. Leeson. *Applied Optics*. Vol. 52 (no. 33), pp. 7867-7873.

3. Aronov L.V. Procedura rascheta energeticheskogo byudzheta podvodnogo otkrytogo opti-cheskogo kanala peredachi informacii. Novye informacionnye tekhno-logii v nauchnyh issledovaniyah materialy XHII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii studentov, molodyh uchenyh i specialistov. Ryazanskij gosudarstvennyj radiotekhnicheskij universitet. 2017, pp. 84-86. (in Russian).

4. William M. Irvine Infrared optical properties of water and ice spheres [Tekst] / William M. Irvine, James B. Pollack. *Icarus*. 1968, no. 8, pp. 324-360.

5. Kaushal H. Underwater optical wireless communication [Tekst] / H. Kaushal, G. Kaddoum. *IEEE Access*. 2016, vol. 4, pp. 1518-1547.

6. Abd El-Naser A. Mohamed. Underwater wireless optical communications for short range typi-cal ocean water types [Tekst] / Abd El–Naser A. Mohamed, Hamdy A. Sharshar, Ahmed Nabih Zaki Rashed, Enab Salah El-dien. *Canadian journal on electrical and electronics engineering*. 2012, no. 7, vol. 3, pp. 344-361.

7. Kirillov S. N., Balyuk S.A., Kuznecov S.N., Esenin A.S. Razrabotka modeli rasprostraneniya opticheskogo signala v vodnoj srede dlya podvodnyh sistem peredachi informacii. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta*. 2012, no. 2, pp. 3-8. (in Russian).

8. Aronov L.V. Cravnenie predel'noj dal'nosti kodoimpul'snoj i pozicionnoj modulyacij po intensivnosti v podvodnom lazernom kanale [Tekst] / L. V. Aronov. *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki i proizvod-stva. materialy V Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii.* Ryazanskij gosudarstvennyj radio-tekhnicheskij universitet imeni V.F. Utkina. Ryazan'. 2020, pp. 80-87. (in Russian).

9. Kameda T. Chlorophyll biomass off Sanriku, Northwestern Pacific, estimated by Ocean Color and Temperature Scanner (OCTS) and a vertical distribution model / T. Kameda, S. Matsumura. *J. Oceanogr.* 54, 509-516 (1998).

10. **Mosharov S.A.** Seasonal Variability of Plankton Production Parameters as the Basis for the Formation of Organic Matter Flow in the Southeastern Part of the Baltic Sea / S.A. Mosharov, I.V. Mosharova, O.A. Dmitrieva, A.S. Semenova, M.O. Ulyanova. *Water*. 2022, 14, 4099. DOI: 10.3390/w14244099

11. Kirillov S.N., Aronov L.V. Propusknaya sposobnosť podvodnogo opticheskogo kanala peredachi informacii s kodoimpul'snoj modulyaciej po intensivnosti. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta*. 2020, no. 4 (74), pp. 3-13. (in Russian). DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-3-13.