

УДК 535:631.373

## ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ВЫСОТ НАД МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ ДЫМКИ И ТУМАНА

Нгуен Дык Тунг<sup>a</sup>, Е.Г. Лебедько<sup>a</sup>, Нгуен Ван Чьонг<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: [tungduc88@gmail.com](mailto:tungduc88@gmail.com)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 18.06.18, принята к печати 20.07.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-758-764

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Нгуен Дык Тунг, Лебедько Е.Г., Нгуен Ван Чьонг. Возможность измерения малых высот над морской поверхностью в условиях дымки и тумана // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 5. С. 758–764. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-758-764

### Аннотация

**Предмет исследования.** Выполнен анализ возможности создания всепогодных импульсных лазерных высотомеров для измерения малых высот над морской поверхностью. Предложены особенности проектирования высотомера, учитывающие случайный характер отражающих свойств и низкий коэффициент отражения водной поверхности. **Метод.** Проведены теоретический анализ и численное моделирование временных характеристик помехи обратного рассеяния и средней мощности сигнала, отраженного от морской поверхности. Метод измерения высоты до морской поверхности в условиях тумана и дымки основан на измерении временного интервала между моментами фиксации спада излучаемого сигнала и спада помехи обратного рассеяния при появлении помехи обратного рассеяния выше определяемого уровня. **Основные результаты.** Предложена структурная схема импульсного лазерного высотомера, которая дает возможность измерения малых высот до морской поверхности практически в любых метеорологических условиях. Определены диапазоны измеряемых высот в чистой атмосфере и в условиях тумана и дымки. **Практическая значимость.** Предлагаемая схема обеспечивает навигацию низколетящих аппаратов над поверхностью моря в условиях радиопомех при любых погодных условиях.

### Ключевые слова

морская поверхность, импульсная характеристика, помеха обратного рассеяния, индикатриса рассеяния, средняя мощность, фиксация отраженного сигнала, всепогодный импульсный лазерный высотомер

## POSSIBILITY OF LOW ALTITUDES MEASUREMENT ABOVE SEA SURFACE UNDER CONDITIONS OF HAZE AND FOG

Nguyen Duc Tung<sup>a</sup>, E.G. Lebedko<sup>a</sup>, Nguyen Van Truong<sup>a</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: [tungduc88@gmail.com](mailto:tungduc88@gmail.com)

### Article info

Received 18.06.18, accepted 20.07.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-758-764

Article in Russian

**For citation:** Nguyen Duc Tung, Lebedko E.G, Nguyen Van Truong. Possibility of low altitudes measurement above sea surface under conditions of haze and fog. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 758–764 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-758-764

### Abstract

**Subject of Research.** This paper presents analysis of the possibility for establishing all-weather pulse laser altimeters for measuring of low altitudes above the sea surface. We proposed special design features which take into account the random nature of the reflective properties and low reflection coefficient of the water surface. **Method.** Theoretical analysis and numerical simulation of temporal characteristics of backscattering return and average power reflected from the sea surface were carried out. The method of altitude measuring to the sea surface in conditions of fog and haze is based on the time interval measuring between the emitted pulse drop and the backscattered signal drop when backscattered signal exceeds the certain level. **Main Results.** A block diagram of pulsed laser altimeter is proposed which makes it possible to measure low altitudes to the sea surface in various meteorological conditions. The ranges of measured altitudes are determined in the clean atmosphere and in the conditions of fog and haze. **Practical Relevance.** The proposed scheme ensures the navigation of low-flying vehicles above the sea surface under radio interference in all-weather conditions.

### Keywords

sea surface, impulse characteristics, reflection characteristics, backscattering return, scattering phase function, average intensity, fixing reflected signal, all-weather pulsed laser altimeter

### Введение

Измерение высоты до морской поверхности импульсными лазерными высотомерами связано с низкой вероятностью фиксации отраженного сигнала вследствие случайного характера отражающих свойств морского волнения. В этом случае приходится увеличивать частоты зондирующих импульсов и их среднюю мощность. Считается, что в условиях тумана и дымки над морской поверхностью определить дистанцию до нее не представляется возможным. Это обусловлено не только снижением принимаемой мощности излучения, но и наличием помехи обратного рассеяния, мощность которой существенно превышает мощность принимаемого сигнала. В этом случае определение особенно малых высот до морской поверхности считается невозможным.

Однако учитывая, что коэффициент отражения морской поверхности, нормально ориентированной к излучению, составляет 0,02–0,04, окончание помехи обратного рассеяния будет соответствовать по времени моменту появления отраженного от гладкой морской поверхности сигнала при чистой атмосфере. В этом случае можно определить высоту до морской поверхности при каждом зондирующем импульсе, фиксируя временное положение спада помехи обратного рассеяния. Задача заключается в исследовании возможности создания всепогодного импульсного лазерного высотомера малых высот до морской поверхности и определения диапазона измеряемых высот в условиях тумана, дымки и чистой атмосферы. При этом основной задачей является исследование возможности измерения высоты в условиях тумана и дымки.

### Временная структура помехи обратного рассеяния

Рассмотрим временную структуру помехи обратного рассеяния и среднюю мощность отраженного сигнала от морской поверхности при ветровом волнении.

Временную функцию помехи обратного рассеяния  $P(t)$  определим по формуле

$$P(t) = \int_0^t g(\tau) S_1(t - \tau) d\tau,$$

где  $S_1(t)$  – зондирующий импульс, в качестве которого использован косинусоидальный импульс

$$S_1(t) = \begin{cases} \Phi_{\pi} \cos \frac{\pi t}{\tau} & \text{при } t < \frac{\tau}{2} \\ 0 & \text{при } t > \frac{\tau}{2} \end{cases}.$$

Здесь  $\Phi_{\pi}$  – мощность излучения;  $\tau$  – длительность зондирующего импульса на уровне 0,5 от максимального значения;  $g(t)$  – импульсная характеристика помехи обратного рассеяния атмосферы:

$$g(t) = \frac{k_0 \sigma_{\mu} \Phi_{\pi}}{ct^2} \exp\{-\varepsilon ct\}, \tag{1}$$

$$g(t) = \frac{4\sigma_{\mu} \Phi_{\pi} \exp\{-\varepsilon ct\}}{\pi c t^2} \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{t_0}{t} - \frac{t_0}{t} \sqrt{1 - \left(\frac{t_0}{t}\right)^2} \right], \tag{2}$$

где  $\sigma_{\mu}$  – показатель рассеяния атмосферы;  $\varepsilon$  – показатель ослабления атмосферы;  $k_0$  – коэффициент, зависящий от характеристик полей излучения и приема;  $t_0$  – время, соответствующее дистанции от приемного объектива до пересечения полей излучения и приема;  $c$  – скорость света;  $\Phi_{\pi}$  – среднее значение индикатрисы рассеяния в направлении назад. Экспериментально подтвержденные в работах [1–3] соотношения (1) и (2) описывают импульсные характеристики обратного рассеяния атмосферы для коаксиальной приемно-передающей системы и бистатической схемы соответственно.

Для чистой атмосферы  $\Phi_{\pi}=0,93$  (по нормировке индикатрисы Фесенковой) [4].

В случае дымки и тумана для описания индикатрисы рассеяния аэрозольной атмосферы используем функцию Хэньи–Гринштейна [5]:

$$\varphi(\gamma) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2 \cdot g \cdot \cos(\gamma))^{\frac{3}{2}}}; \quad \Phi_{\pi} = \varphi(\pi),$$

где  $0 \leq g < 1$  – несимметричный параметр индикатрисы: чем он больше, тем сильнее вытянется вперед индикатриса. Для сильной дымки  $0,7 \leq g < 0,8$ , слабого и среднего тумана  $0,8 \leq g < 0,85$ , сильного тумана  $0,85 \leq g < 0,9$ , дождей и снега  $0,9 \leq g < 1,0$ .

Показатель рассеяния атмосферы определялся по формуле

$$\sigma_{\mu} = \frac{3,912}{L_M} \left( \frac{0,55}{\lambda} \right)^q, \quad q = 0,585 \sqrt[3]{L_M},$$

где  $L_M$  – метеорологическая дальность видимости (МДВ).

На рис. 1, 2 приведены соответственно импульсные характеристики помехи обратного рассеяния при коаксиальной и бистатической приемно-передающих оптических систем для различных состояний атмосферы. На этих рисунках по оси абсцисс приведены две шкалы: одна ( $t$ ) – временная, вторая ( $z$ ) – соответствующая ей в метрах.

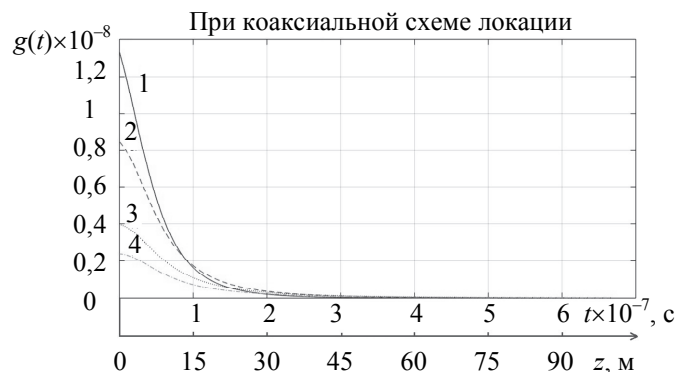


Рис. 1. Импульсная характеристика обратного рассеяния атмосферы при коаксиальной схеме локации для условий: очень сильного тумана (1); сильного тумана (2); среднего тумана (3); слабого тумана (4)

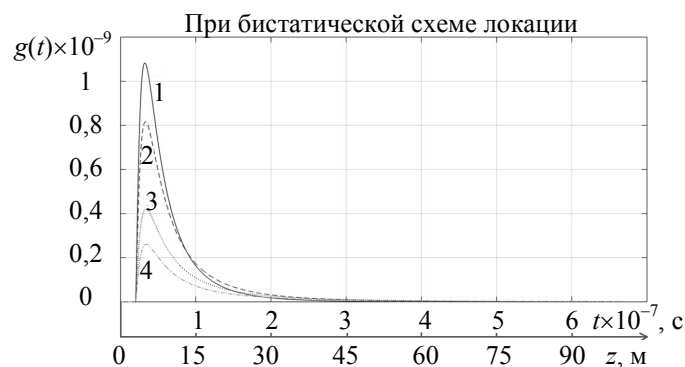


Рис. 2. Импульсная характеристика обратного рассеяния атмосферы при бистатической схеме локации для условий: очень сильного тумана (1); сильного тумана (2); среднего тумана (3); слабого тумана (4)

На рис. 3, 4 приведены временные характеристики мощности помехи обратного рассеяния при сильном и слабом тумане соответственно для коаксиальной схемы расположения приемной и передающей оптических систем при мощности зондирующего импульса  $\Phi_n=50$  Вт на длине волны излучения 0,91 мкм. На графиках обозначается УССФ – уровень срабатывания схемы фиксации. Использованы те же шкалы, что и на рис. 1, 2.

На рис. 3, 4 также приведены возможные принимаемые сигналы, рассчитываемые по формуле (3), при различных высотах в условиях слабого и сильного тумана.

Измерение малых высот над морской поверхностью импульсным лазерным высотомером сопряжено с низкой вероятностью приема отраженных сигналов от морской поверхности в силу того, что отражающая поверхность представляет собой множество элементарных зеркальных отражателей, случайно ориентированных в пространстве. Вероятностные характеристики приема сигналов исследованы в работах [6–10].

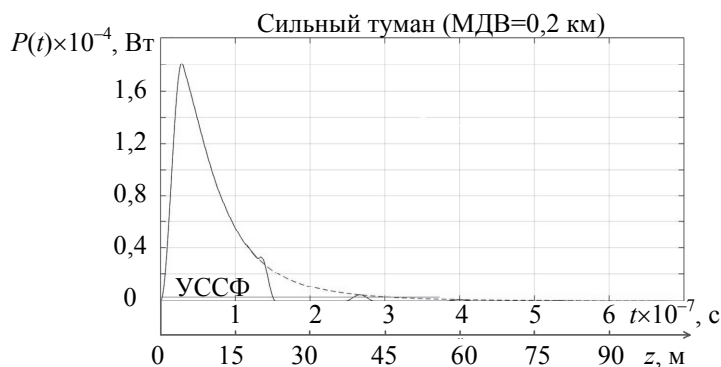


Рис. 3. Временные характеристики помехи обратного рассеяния атмосферы и возможных отраженных сигналов от морской поверхности при условии сильного тумана

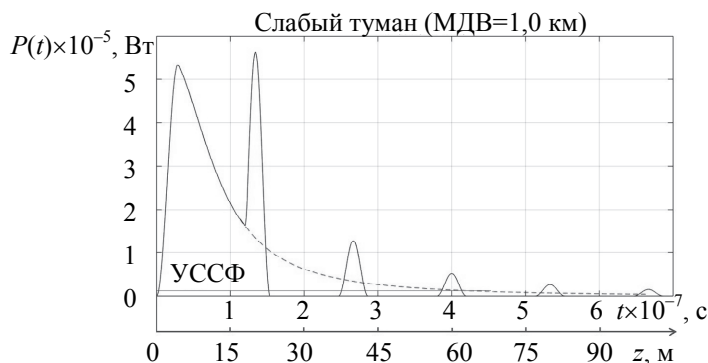


Рис. 4. Временные характеристики помехи обратного рассеяния атмосферы и возможных отраженных сигналов от морской поверхности при условии слабого тумана

Средняя мощность этих сигналов рассчитывалась по формуле [11, 12]

$$\bar{\Phi}(z) = \frac{D^2 \Phi_{\text{и}} \rho \tau_3 (\beta_1^2 + \beta_2^2)}{32z^2 \beta_1^2} \frac{1}{[M_2(\gamma_x) M_2(\gamma_y)]^{1/2}}, \quad (3)$$

где  $D$  – диаметр входного зрачка приемной оптической системы;  $\rho=0,027$  – коэффициент отражения от гладкой морской поверхности;  $\tau_3 = \exp\{-2\epsilon z\}$  – коэффициент ослабления излучения в атмосфере;  $z$  – расстояние до морской поверхности;  $\beta_1, \beta_2$  – углы полей излучения и приема;  $M_2(\gamma_x), M_2(\gamma_y)$  – дисперсии наклонов морской поверхности в плоскостях  $xOz$  и  $yOz$  соответственно, при скорости ветра  $U=5$  м/с и угле между осью  $Ox$  и направлением ветра  $\varphi = 30^\circ$ :  $M_2(\gamma_x) = 0,015, M_2(\gamma_y) = 0,015$ .

Здесь необходимо заметить, что величина принимаемого сигнала даже при чистой атмосфере с высокой вероятностью будет меньше порогового уровня, и потребуется значительное число зондирующих импульсов для определения контакта с водой, т.е. фиксации отраженного сигнала. Следует также отметить, что проведенный анализ публикаций о расширении длительности сигнала, прошедшего атмосферу при различных ее состояниях [13–17], показал, что временное уширение светового импульса для наилучших условий не превышает  $10^{-9}$  с.

На рис. 3, 4 в качестве иллюстрации для высоты 20 м показано, что временная функция помехи обратного рассеяния обрывается вследствие низкого коэффициента отражения поверхности. Большая часть излучения уходит в воду. При этом рассеяние излучения в водной среде дает сигнал существенно ниже порогового даже при чистой атмосфере [6]. Аналогична эта ситуация и на других высотах.

Таким образом, фиксация временного положения спада помехи обратного рассеяния позволяет осуществлять контакт с водной поверхностью в сложных метеоусловиях при каждом зондирующем импульсе. В этом случае временной интервал между моментами фиксации временного положения спада импульса излучения (зондирующего) и спада помехи обратного рассеяния будет соответствовать измеряемой высоте.

Из приведенных рис. 3, 4 также видно, что, например, для заданной вероятности ложной тревоги  $10^{-4}$ , которая определяет уровень срабатывания при приеме сигнала, фиксацию спада помехи обратного рассеяния можно осуществлять на высотах до 70 м в условиях тумана различной плотности.

### Всепогодный импульсный лазерный высотомер

Естественно, что для измерения малых высот над морской поверхностью приемная система импульсного лазерного высотомера должна состоять из двух каналов: канала обычного измерения расстояний, в котором используется схема отключения съема информации о дистанции до поверхности моря при отраженных сигналах, меньших уровня срабатывания, и канала, включаемого по достижению помехой обратного рассеяния некоторого уровня. В этом канале осуществляется фиксация временного положения сигнала по его спаду.

На основании изложенного предлагается для измерения малых высот над морской поверхностью при любых метеорологических условиях структурная схема всепогодного импульсного лазерного высотомера, приведенная на рис. 5. На рис. 5 использованы следующие обозначения: ПОС – передающая оптическая система, ЛИИ – лазерный источник импульсного излучения, БПиС – блок питания и синхронизации, СП – светопровод, ФПОК – фотоприемник опорного канала, ТрШ – триггер Шмитта (схема фиксации фронта и спада сигнала), ЛЗ – линия задержки на короткий промежуток времени  $\tau_3$ , ПрОС – приемная оптическая система, ФП – фотоприемник, ВУ – видеусилитель, ПУ – пороговое устройство, уровень срабатывания которого соответствует величине помехи обратного рассеяния при слабой дымке, СС – схема совпадения, САС – схема антисовпадения, ИУ – измерительное устройство, Тр.П – триггер

переполнения счетчика дистанции, ССбр – схема обнуления счетчика и триггера измерительного устройства, СхСИ – схема съема информации.

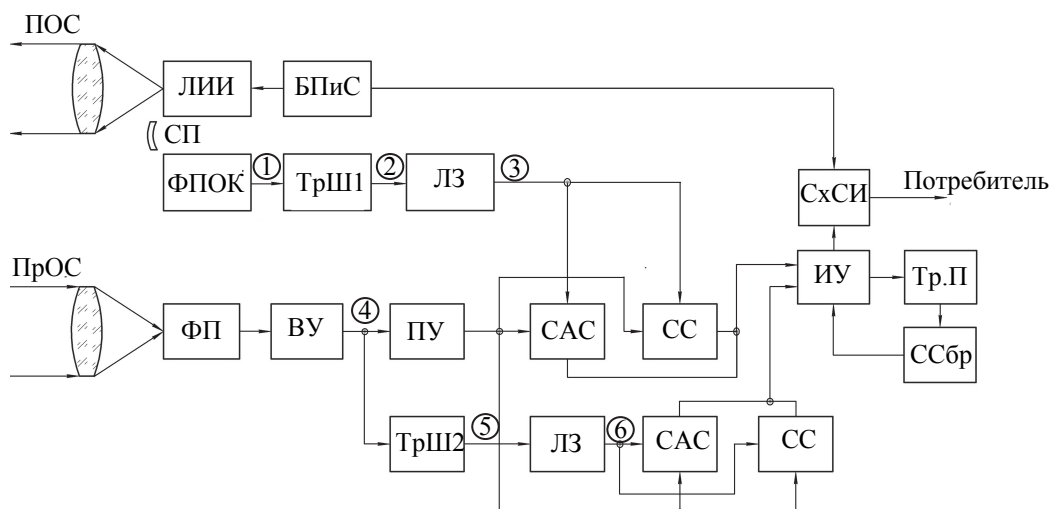


Рис. 5. Структурная схема всепогодного импульсного лазерного высотомера

На рис. 6 приведены временные диаграммы, поясняющие работу высотомера. На графике обозначаются: УС – уровень срабатывания,  $T_u$  – временной интервал, соответствующий измеряемой высоте. Цифрами в кружках «1»–«6» указаны напряжения сигналов, соответствующие позициям цифр на структурной схеме рис. 5 в условиях чистой атмосферы, «4'»–«6'» – напряжения сигналов при наличии дымки или тумана.

Работа высотомера в условиях чистой атмосферы осуществляется та же, как в обычном импульсном лазерном дальнометре при открытых схемах САС и закрытых схемах СС по фронтам импульсов, снимаемых с триггеров Шмитта в опорном и приемных каналах. В этом режиме работы при отсутствии принимаемого сигнала вследствие случайной поверхности моря счетчик дистанции измерительного устройства переполняется, срабатывает триггер переполнения Тр.П, запускается схема обнуления счетчика и триггера измерительного устройства. В этом случае потребителю с СхСИ не снимается информация о высоте.

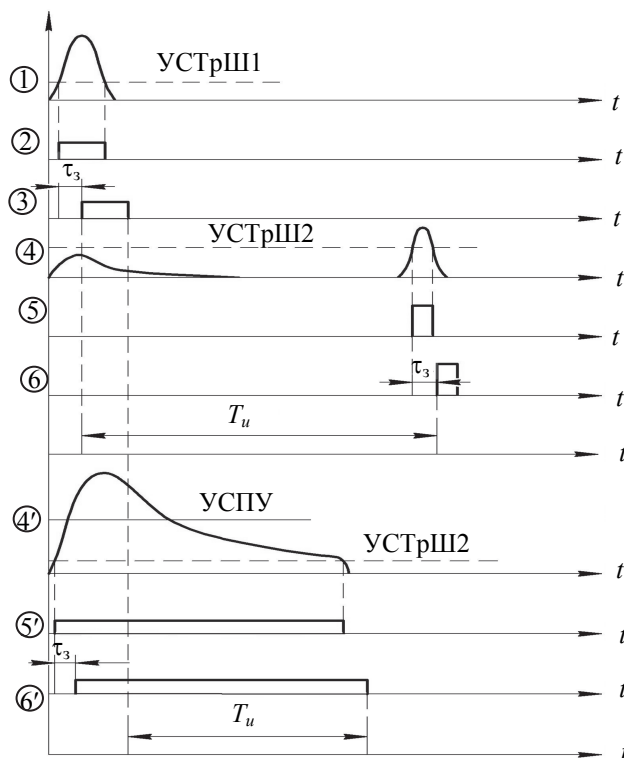


Рис. 6. Временные диаграммы работы высотомера

При наличии дымки или тумана величина помехи обратного рассеяния превышает уровень срабатывания порогового устройства ПУ. При этом закрываются САС и открываются СС, и измерение высоты осуществляется по временному интервалу, сформированному спадом сигнала с ТрШ1 опорного канала и спадом импульса с ТрШ2, соответствующего спаду помехи обратного рассеяния. Линии задержки с одинаковым временем задержки устанавливаются для предотвращения срабатывания по фронту помехи обратного рассеяния, так как уровень срабатывания ТрШ2 меньше уровня срабатывания ПУ.

### Заключение

Проведенный анализ измерения малых высот импульсным лазерным высотомером до морской поверхности показал возможность измерения дистанции до поверхности моря в условиях тумана и дымки вследствие спада помехи обратного рассеяния в момент достижения излучения морской поверхности из-за низкого коэффициента отражения поверхности. При этом, если при излучаемом импульсе мощностью 50 Вт диапазон измерения в чистой атмосфере составляет от 5 до 100 м, то в условиях тумана и дымки он ограничивается высотой 50–70 м.

Предлагается структурная схема всепогодного импульсного лазерного высотомера малых высот до морской поверхности, обеспечивающая измерение дистанции как в чистой атмосфере, так и в условиях дымки и тумана. При этом использование лазерного высотомера в сложных метеоусловиях обеспечивает не только постоянный контакт с водой, но и уверенную работу в условиях радиопомех.

### Литература

1. Лебедько Е.Г. Системы импульсной оптической локации. СПб.: Лань, 2014. 368 с.
2. Козлов В.П., Федорова Е.О. Отражение света от рассеивающей среды // ОМП. 1967. № 1. С. 1–7.
3. Скредлин А.Л., Иванов А.П., Калинин И.И. Пространственно-временная структура световой дымки от импульсного излучателя в атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1970. Т. 6. С. 889–899.
4. Волохатюк В.А., Кочетков В.М., Красовский Р.Р. Вопросы оптической локации. М.: Советское радио, 1971. 176 с.
5. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Основы теоретической атмосферной оптики. СПб.: СПбГУ, 2007. 152 с.
6. Лебедько Е.Г., Покровский Ю.П., Порфирьев Л.Ф., Симовский Р.А., Иванов В.И. Вероятностные характеристики отражения импульсных сигналов от взволнованной водной поверхности // Изв. вузов. Приборостроение. 1976. Т. 19. № 6. С. 109–113.
7. Bass F.G., Fuks I.M. Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces. Oxford: Pergamon Press, 1979. 540 p.
8. Phillips D.M. Effects of the wavenumber spectrum of sea surface on laser beam reflection // Australian Journal of Physics. 1979. V. 32. N 5. P. 469–489. doi: 10.1071/ph790469
9. Cox C., Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter // Journal of the Optical Society of America. 1954. V. 44. N 11. P. 838–850. doi: 10.1364/josa.44.000838
10. Hieronymi M. Polarized reflectance and transmittance distribution functions of the ocean surface // Optics Express. 2016. V. 24. N 14. P. 1045–1068. doi: 10.1364/oe.24.0a1045
11. Tsai B.M., Gardner C.S. Remote sensing of sea state using laser altimeter // Applied Optics. 1982. V. 21. N 21. P. 3932–3940. doi: 10.1364/ao.21.003932
12. Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.А., Стрелков Б.В. Мощность лазерного сигнала, принимаемого локатором от случайного участка неровной морской поверхности // Вестник МГТУ. Серия: Приборостроение. 2008. № 3. С. 3–15.
13. Bucher E.A., Lerner R.M. Experiments on light pulse communication and propagation through atmospheric clouds // Applied Optics. 1973. V. 12. N 10. P. 2401–2414. doi: 10.1364/ao.12.002401
14. Ito S., Furutsu K. Theory of light pulse propagation through thick clouds // Journal of the Optical Society of America. 1980. V. 70. N 4. P. 366–374. doi: 10.1364/josa.70.000366
15. Stotts L.B. Closed form expression for optical pulse broadening in multiple-scattering media // Applied Optics. 1978. V. 17. N 4. P. 504–505. doi: 10.1364/ao.17.000504
16. Liu C.H., Yeh K.C. Propagation of pulsed beam waves

### References

1. Lebed'ko E.G. *Pulsed Optical Location Systems*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2014, 368 p. (in Russian)
2. Kozlov V.P., Fedorova E.O. Reflection of light from a scattering medium. *Opticheskiy Zhurnal*, 1967, no. 1, pp. 1–7. (in Russian)
3. Skrelin A.L., Ivanov A.P., Kalinin I.I. Spatial-temporal structure of light haze from a pulsed radiator in the atmosphere. *Izv. AN SSSR. Fizika Atmosfery i Okeana*, 1970, vol. 6, pp. 889–899. (in Russian)
4. Volokhatyuk V.A., Kochetkov V.M., Krasovskii P.P. *Optical Location Problems*. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1971, 176 p. (in Russian)
5. Timofeev Yu.M., Vasil'ev A.V. *Fundamentals of Theoretical Atmospheric Optics*. St. Petersburg, SPbSU Publ., 2007, 152 p. (in Russian)
6. Lebed'ko E.G., Pokrovskii Yu.P., Porfir'ev L.F., Simovskii R.A., Ivanov V.I. Probabilistic characteristics of impulse signals reflection from an agitated water surface. *Journal of Instrument Engineering*, 1976, vol. 19, no. 6, pp. 109–113. (in Russian)
7. Bass F.G., Fuks I.M. *Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces*. Oxford, Pergamon Press, 1979, 540 p.
8. Phillips D.M. Effects of the wavenumber spectrum of sea surface on laser beam reflection. *Australian Journal of Physics*, 1979, vol. 32, no. 5, pp. 469–489. doi: 10.1071/ph790469
9. Cox C., Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, vol. 44, no. 11, pp. 838–850. doi: 10.1364/josa.44.000838
10. Hieronymi M. Polarized reflectance and transmittance distribution functions of the ocean surface. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 14, pp. 1045–1068. doi: 10.1364/oe.24.0a1045
11. Tsai B.M., Gardner C.S. Remote sensing of sea state using laser altimeter. *Applied Optics*, 1982, vol. 21, no. 21, pp. 3932–3940. doi: 10.1364/ao.21.003932
12. Belov M.L., Gorodnichev V.A., Kozintsev V.A., Strelkov B.V. Power of laser signal being received by radar from random part of uneven sea surface. *Herald of the Bauman MSTU. Series Instrument Engineering*, 2008, no. 3, pp. 3–15. (in Russian)
13. Bucher E.A., Lerner R.M. Experiments on light pulse communication and propagation through atmospheric clouds. *Applied Optics*, 1973, vol. 12, no. 10, pp. 2401–2414. doi: 10.1364/ao.12.002401
14. Ito S., Furutsu K. Theory of light pulse propagation through thick clouds. *Journal of the Optical Society of America*, 1980,

- through turbulence, cloud, rain, or fog // *Journal of the Optical Society of America*. 1977. V. 67. N 9. P. 1261–1266. doi: 10.1364/josa.67.001261
17. Elliott R.A. Multiple scattering of optical pulses in scale model clouds // *Applied Optics*. 1983. V. 22. N 17. P. 2670–2681. doi: 10.1364/ao.22.002670
- vol. 70, no. 4, pp. 366–374. doi: 10.1364/josa.70.000366
15. Stotts L.B. Closed form expression for optical pulse broadening in multiple-scattering media. *Applied Optics*, 1978, vol. 17, no. 4, pp. 504–505. doi: 10.1364/ao.17.000504
16. Liu C.H., Yeh K.C. Propagation of pulsed beam waves through turbulence, cloud, rain, or fog. *Journal of the Optical Society of America*, 1977, vol. 67, no. 9, pp. 1261–1266. doi: 10.1364/josa.67.001261
17. Elliott R.A. Multiple scattering of optical pulses in scale model clouds. *Applied Optics*, 1983, vol. 22, no. 17, pp. 2670–2681. doi: 10.1364/ao.22.002670

**Авторы**

**Нгуен Дык Тунг** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-6551-4780, tungduc88@gmail.com

**Лебедько Евгений Георгиевич** – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 55305233600, ORCID ID: 0000-0002-7612-5729, eleb@rambler.ru

**Нгуен Ван Чыонг** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-1738-7654, vantruongitmo@gmail.com

**Authors**

**Nguyen Duc Tung** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-6551-4780, tungduc88@gmail.com

**Evgeniy G. Lebedko** – D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 55305233600, ORCID ID: 0000-0002-7612-5729, eleb@rambler.ru

**Nguyen Van Truong** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-1738-7654, vantruongitmo@gmail.com