

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БОРТОВОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫСОТОМЕРА ДО МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

НГУЕН ТУНГ ДЫК, НГУЕН ЧЫОНГ ВАН, Е. Г. ЛЕБЕДЬКО

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: eleb@rambler.ru

Рассматриваются особенности проектирования импульсных лазерных высоотомеров до морской поверхности с оптимальной приемной системой обнаружения сигналов, учитывающей случайный характер морской поверхности при различных углах ее облучения в зависимости от крена и тангажа летательного аппарата и случайного характера отраженных сигналов. Приведены рекомендации по выбору частоты зондирующих импульсов и требуемой энергии излучения при заданной постоянной времени измерения высоты.

Ключевые слова: морская поверхность, характеристики отражения, плотность вероятностей, частота зондирующих импульсов, правило принятия решения, ошибки принятия решения, энергия сигнала

При построении лазерных импульсных высоотомеров, измеряющих дистанцию до морской поверхности, следует учитывать, что реальная морская поверхность может быть представлена в виде случайной суперпозиции большого числа волн различных частот и амплитуд. Такая поверхность, с позиции отражения оптического излучения, представляет собой случайное поле, состоящее из множества элементарных зеркальных площадок, случайно ориентированных в пространстве.

Взаимодействие электромагнитного излучения волн оптического диапазона с взволнованной водной поверхностью рассматривалось в ряде работ [1—12]. Тем не менее разработка лазерных импульсных высоотомеров по-прежнему актуальна, при этом интерес представляют вероятностные характеристики отражения. Плотность вероятностей распределения волновых склонов исследовались в работах [6—9]. Выражение для плотности вероятностей отражения оптического излучения от взволнованной морской поверхности имеет следующий вид [9]:

$$W(\varphi) = (2\pi\sigma)^{-1} \exp\left(\frac{-\eta^2}{2}\right) \left[1 + \frac{A}{6}(\eta^3 - 3\eta) + \frac{E}{24}(\eta^4 - 6\eta^2 + 3) + \dots \right], \quad (1)$$

где $\eta = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sigma}$; φ — угол облучения; $\sigma^2 = 3,16 \cdot 10^{-3} \cdot v$, v — скорость ветра, м/с;
 $A = 0,04 - 0,033 \cdot v$ — асимметрия; $e = 0,4$ — коэффициент эксцесса.

Приведенное соотношение плотности вероятностей распределения волновых склонов, полученное при моделировании волнения моря [13], а также результаты теоретических расчетов могут быть в первом приближении аппроксимированы гауссовым законом распределения.

Учитывая коэффициенты отражения от элементарных зеркальных площадок, определенные по формуле Френеля:

$$R(\varphi) = \frac{1}{2} (R_s(\varphi) + R_p(\varphi)),$$

$$R_s(\varphi) = \frac{\left| \cos \varphi - n \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n} \sin \varphi \right)^2} \right|^2}{\left| \cos \varphi + n \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n} \sin \varphi \right)^2} \right|^2}; \quad R_p(\varphi) = \frac{\left| \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n} \sin \varphi \right)^2} - n \cos \varphi \right|^2}{\left| \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n} \sin \varphi \right)^2} + n \cos \varphi \right|^2},$$

где n — число зондирующих импульсов, имеем

$$S(\varphi) = W(\varphi)R(\varphi). \quad (2)$$

Приведенные соотношения и экспериментальные исследования [10—13] указывают на то, что плотность вероятностей приема сигналов от морской поверхности в первом приближении аппроксимируется гауссовым распределением с небольшой асимметрией кривой плотности вероятностей относительно угла визирования ($\varphi = -2^\circ$) при условии, что угол визирования равен углу облучения (рис. 1).

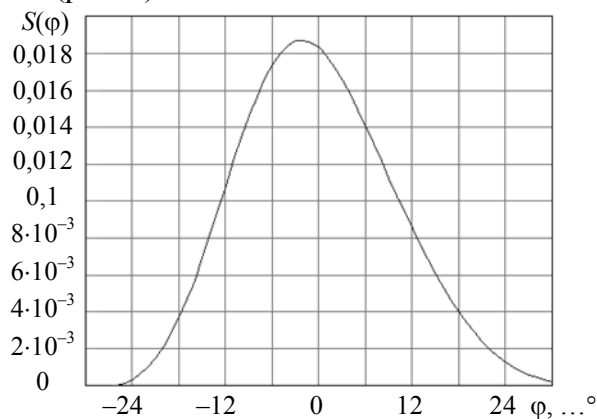


Рис. 1

В этих условиях при проектировании импульсного лазерного высотомера возникают проблемы выбора частоты генерации импульсов при заданной постоянной времени измерения высоты, так как в силу случайного характера отражающей поверхности далеко не при каждом облучающем импульсе отраженный сигнал превысит пороговый уровень. Прежде всего, следует определить минимальную частоту зондирующих импульсов.

Требуемое число зондирующих импульсов n для надежного обнаружения k принимаемых сигналов можно определить по формуле

$$f_k(n) = \sum_k^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k} = P, \quad (3)$$

где p — вероятность приема отраженного сигнала при однократном зондировании морской поверхности, P — вероятность надежного обнаружения отраженного сигнала.

Например, при ширине поля излучения, составляющей $20'$, $P = 0,998$ и $\varphi = -2^\circ$ для надежного обнаружения одного отраженного сигнала согласно выражению (3) потребуется 112 зондирующих импульсов. Для обнаружения двух или трех отраженных сигналов требуется соответственно 155 и 190 импульсов излучения. При угле крена бортового носителя 10° для обнаружения одного, двух и трех отраженных сигналов потребуется соответственно 230, 312 и 385 импульсов облучения морской поверхности. Следовательно, при постоянной времени измерения высоты, например, равной 0,1 с, для низколетящих объектов частота следования импульсов излучения должна составлять около 4—5 кГц.

Существенный интерес представляют энергетические характеристики высоотомеров в условиях оптимального приема, которые определяется правилом принятия решения:

$$\Lambda = \frac{F[y|s(t)]}{F[y|0]}, \quad \Lambda > C \rightarrow H_1, \quad \Lambda < C \rightarrow H_0,$$

где Λ — отношение функционалов правдоподобия при наличии сигнала $F[y|s(t)]$ и его отсутствии $F[y|0]$, C — граница раздела пространств, характеризующих наличием и отсутствием полезного сигнала при соответствующих гипотезах H_1, H_0 .

При этом следует учитывать, что величина импульса a , отраженного от морской поверхности, является случайной и согласно [13] характеризуется при разных углах облучения плотностью вероятностей (рис. 2).

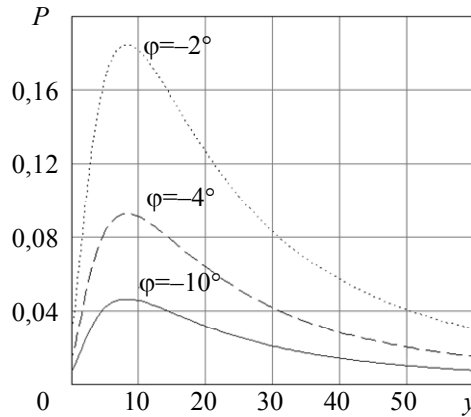


Рис. 2

Представленные на рис. 2 кривые плотностей вероятностей в первом приближении можно аппроксимировать законом Рэлея:

$$W(a) = \begin{cases} 0 & \text{при } a \leq 0; \\ \frac{a}{\sigma_k^2} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_k^2}\right) & \text{при } a > 0. \end{cases}$$

С учетом случайного характера сигнала с плотностью вероятностей $W(a)$ математическое ожидание логарифма отношения правдоподобия принимает следующий вид [14]:

$$\ln \Lambda(a) = \int_0^\infty \ln \Lambda W(a) da, \quad \ln \Lambda(a) > \ln C \int_0^\infty W(a) da \rightarrow H_1, \quad \ln \Lambda(a) < \ln C \int_0^\infty W(a) da \rightarrow H_0.$$

В предположении, что обнаружение сигнала осуществляется на фоне гауссовых шумов с равномерным энергетическим спектром G , логарифм отношения правдоподобия определяется выражением

$$\ln \Lambda = \frac{2}{G} \int_{-\infty}^\infty y(t)s(t)dt - \frac{1}{G} \int_{-\infty}^\infty s^2(t)dt,$$

а математическое ожидание распределения Рэлея имеет значение $\bar{a} = 1,25\sigma_k$. Тогда получим следующее правило принятия решения:

$$\frac{G}{2} \ln C + 0,63 \int_{-\infty}^\infty s^2(t)dt = K,$$

$$\int_{-\infty}^\infty y(t)s(t)dt > K \rightarrow H_1, \quad \int_{-\infty}^\infty y(t)s(t)dt < K \rightarrow H_0.$$

В этом случае на основании байесовских критериев качества условные вероятности ошибочных решений согласно [14] примут следующий вид:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\sqrt{2} \cdot \frac{K}{\sqrt{GE}} \right) \right] = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{\ln C}{\mu} + 0,63\mu \right) \right];$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\sqrt{2} \cdot \frac{K - E}{\sqrt{GE}} \right) \right] = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{\ln C}{\mu} - 0,37\mu \right) \right],$$

где α — вероятность ложной тревоги, β — вероятность пропуска сигнала, $E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt$ — энергия сигнала, $\mu = \sqrt{2E/G}$ — отношение сигнала к шуму, $\Phi(z)$ — интегральная функция Лапласа.

Для заданной вероятности ложной тревоги, соответствующей приему детерминированного сигнала, при случайном характере принимаемого сигнала, удовлетворяющем закону Рэлея, имеем

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{\ln C}{\mu} + 0,5\mu \right) \right], \quad \beta = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{\ln C}{\mu} - 0,29\mu \right) \right]. \quad (4)$$

Из соотношений (4) следует, что для обеспечения такой же вероятности пропуска сигнала, что и при детерминированном характере сигнала, энергию излучения следует увеличить в 1,7 раза.

Таким образом, для надежного измерения высоты до морской поверхности бортовыми импульсными лазерными высотомерами в условиях появления крена и тангажа в пределах 10° при постоянной времени измерения 0,1 с необходимо обеспечить частоту зондирующих импульсов 4—5 кГц. При этом вследствие случайного характера отраженных сигналов необходимо при расчете требуемой энергии излучения увеличить ее почти в 2 раза по отношению к детерминированному сигналу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А. П. Физические основы гидрооптики. Минск: Наука и техника, 1975. 526 с.
2. Mobley C. D. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters. Academic, 1994.
3. Bass F. G., Fuks I. M. Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces. Oxford: Pergamon Press, 1979.
4. Jelalian A. V. Sea echo at laser wavelengths // Proc. IEEE. 1968. Vol. 56, N 5. P. 828—835.
5. Phillips D. M. Effects of the wavenumber spectrum of sea surface on laser beam reflection // Australian Journal of Physics. 1979. Vol. 32, N 5. P. 469—489.
6. Longuet-Higgins M. S. The effect of non-linearities on statistical distribution in the theory of sea waves // J. of Fluid Mechanics. 1963. Vol. 17, N 3. P. 459—480.
7. Запевалов А. С., Пустовойтенко В. В. Моделирование плотности вероятностей уклонов морской поверхности в задачах рассеяния радиоволн // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 2. С. 110—121.
8. Hieronymi M. Polarized reflectance and transmittance distribution functions of the ocean surface // Opt. Express. 2016. Vol. 24, N 14. P. 1045—1068.
9. Cox C., Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter // J. of the Opt. Society of Amer. 1954. Vol. 44, N 11. P. 838—850.
10. Гуревич Г. С. О статистических характеристиках лазерного излучения, отраженного от морской поверхности // Оптика моря: Сб. М.: Наука, 1983. С. 137—142.
11. Шифрин К. С., Гардашев Р. Г. Модельные расчеты отражения света от морской поверхности // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21, № 2. С. 162—169.

12. Tsai B. M., Gardner C. S. Remote sensing of sea state using laser altimeter // *Appl. Optics*. 1982. Vol. 21, N 21. P. 3932—3940.
13. 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 СССР. Приборостроение*. 1976. Т. 19, № 6. С. 109—113.
14. Лебедько Е. Г. Теоретические основы передачи информации. СПб: Изд-во „Лань“, 2011. 352 с.

Сведения об авторах

- Нгуен Тунг Дык** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: tungduc88@gmail.com
- Нгуен Чыонг Ван** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: vantruongitmo@gmail.com
- Евгений Георгиевич Лебедько** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: eleb@rambler.ru

Поступила в редакцию
20.08.18 г.

Ссылка для цитирования: Нгуен Тунг Дык, Нгуен Чыонг Ван, Лебедько Е. Г. Особенности проектирования бортового импульсного лазерного высотомера до морской поверхности // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2018. Т. 61, № 9. С. 745—750.

**PECULIARITIES OF DESIGNING OF ON-BOARD PULSE LASER ALTIMETER
TO MEASURE THE HEIGHT ABOVE THE SEA SURFACE**

Nguyen Tung Dyk, Nguyen Chyong Van, E. G. Lebedko

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: eleb@rambler.ru*

Peculiarities of designing pulse laser altimeter to measure the aircraft height above the sea surface are considered. An optimal receiving system used for surface-reflected signal detection takes into account the random characteristics of the surface at various angles of sounding laser beam incidence depending on the aircraft roll and pitch as well as random amplitude of reflected pulses. Recommendations are formulated for choice of sounding pulse repetition rate and emitted energy at a given time constant of height measurement.

Keywords: sea surface, reflectance characteristics, probability density, sounding pulse repetition rate, decision making rule, signal energy

REFERENCES

1. Ivanov A.P. *Fizicheskiye osnovy gidrooptiki* (Physical Fundamentals of Hydrooptics), Minsk, 1975, 526 p. (in Russ.)
2. Mobley C.D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*, Academic, 1994.
3. Bass F.G., Fuks I.M. *Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces*, Pergamon Press, Oxford, 1979.
4. Jelalian A.V. *Proc. IEEE*, 1968, no. 5(56), pp. 828—835.
5. Phillips D.M. *Aust. J. Phys.*, 1979, no. 5(32), pp. 469—489.
6. Longuet-Higgins M.S. *Journal of Fluid Mechanics*, 1963, no. 3(17), pp. 459—480.
7. Zapevalov A.S., Pustovoytenko V.V. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2010, no. 2(53), pp. 110—121. (in Russ.)
8. Hieronymi M. *Opt. Express*, 2016, no. 14(24), pp. 1045—1068.
9. Cox C., Munk W. *JOSA*, 1954, no. 11(44), pp. 838—850.
10. Gurevich G.S. *Optika morya* (Sea Optics), Moscow, 1983, pp. 137—142. (in Russ.)
11. Shifrin K.S., Gardashev R.G. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 1985, no. 2(21), pp. 162—169. (in Russ.)
12. Tsai B.M., Gardner C.S. *Appl. Opt.*, 1982, no. 21(21), pp. 3932—3940.
13. Lebed'ko E.G., Pokrovskiy Yu.P., Porfir'yev L.F., Simovskiy P.A., Ivanov V.I. *Journal of Instrument Engineering*, 1976, no. 6 (19), pp. 109—113. (in Russ.)
14. Lebed'ko E.G. *Teoreticheskiye osnovy peredachi informatsii* (Theoretical Bases of Information Transfer), St. Petersburg, 2011. 352 p. (in Russ.)

Data on authors

- Nguyen Tung Dyk** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: tungduc88@gmail.com
- Nguyen Chyong Van** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: vantruongitmo@gmail.com
- Evgeny G. Lebedko** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: eleb@rambler.ru

For citation: Nguyen Tung Dyk, Nguyen Chyong Van, Lebedko E. G. Peculiarities of designing of on-board pulse laser altimeter to measure the height above the sea surface. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 9. P. 745—750 (in Russian).

DOL: 10.17586/0021-3454-2018-61-9-745-750