

печение и юстировку и тем самым повысить быстродействие и надежность функционирования флэш-лидара.

Литература

1. Zege, E. P. Image Transfer through a Scattering Medium / E. P. Zege, F. P. Ivanov, I. L. Katsev. – Verlag, Berlin, 1991.

2. Ivanov, V. I. Method creasing the efficiency of laser active-pulsed vision systems for obyects wich quasi-zero optical contrast / V. I. Ivanov, N. I. Ivanov // J. Appl. Spectr. – 2022. – V. 89 (6).

3. Time of Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications / M. Hansard [et al.]. – Springer, 2012.

4. Ivanov, V. I. Methodology and algorithms for obtaining long-range 3D portraits of objects based on 2D intensity distributions of truncated realizations of reflected laser radiation / V.I. Ivanov // Computer Optics. – 2024. – V. 48, № 3. – P. 386–396.

5. Иванов, В. И. Метод увеличения дальности действия флэш – лидара на основе матричного фотодетектора с накоплением зарядов пикселов / В. И. Иванов // В настоящем сборнике.

УДК 621.391.63;535.361

МЕТОД УВЕЛИЧЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ФЛЭШ-ЛИДАРА НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО ФОТОДЕТЕКТОРА С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА ПИКСЕЛОВ Иванов В. И.

*НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрен метод увеличения дальности флэш-лидара для определения рельефометрических сигнатур дальностных объектов, позволяющий существенно повысить коэффициент эффективности использования зондирующего лазерного излучения и тем самым в десятки и сотни раз увеличить их дальность действия по сравнению с флэш-лидарами на основе ToF технологии «Range gated imagers».

Ключевые слова: флэш-лидар, рельефометрическая сигнатура, дальность.

METHOD FOR INCREASING THE RANGE OF FLASH LIDAR BASED ON A MATRIX PHOTO DETECTOR WITH PIXEL CHARGE ACCUMULATION

Ivanov V.

*Institute for nuclear problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The article considers a method for increasing the range of a flash lidar for determining relief-metric signatures of long-range objects, which allows to significantly increase the efficiency coefficient of using probing laser radiation and thereby increase their range by tens and hundreds of times compared to flash lidars based on ToF technology “Range gated imagers”.

Keywords: flash lidar, relief-metric signature, range.

*Адрес для переписки: Иванов В. И., ул. Бобруйская 11, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: ivanov.inp@gmail.com*

Обеспечение высокой вероятности правильного обнаружения и распознавания высокочастотных слабоконтрастных объектов во многих случаях требует получения рельефометрических сигнатур (3D портретов) объектов $\xi_i(S)$ (где ξ_i – глубина рельефа поверхности S в i -той точке) лазерно-локационными методами [1, 2]. Необходимое при этом высокое быстродействие и широкоапертурный захват объекта достигается применением специальных лидаров – флэш-лидаров (Flash-LIDAR) на базе многопиксельных матричных TOF-камер с интегрированными процессорами многоканальной обработки, которые обеспечивают получение рельефометрических сигнатур объекта одновременно на большом множестве N точек его поверхности S без оптико-механического сканирования [2–5].

Согласно ToF технологии «Range gated imagers» [5] для каждого пиксела фотоматрицы ToF

осуществляется определение энергии отраженных сигналов, пропорционально времени запаздывания парциальных пучков отраженного излучения $\tau_i(S, t)$, в виде электрических зарядов на МДП – конденсаторах пиксела. Заряд конденсаторов каждого пиксела осуществляется во временных строках длительностью τ_{si} , равной времени запаздывания парциальных пучков относительно моментов излучения лазерных импульсов. Причем, длительность лазерных импульсов должна удовлетворять условию [5]

$$\tau_{p,ToF} \geq 2R_{max}/C, \quad (1)$$

где R_{max} – максимальное расстояние до точки поверхности объекта от лидара; C – скорость света.

Как следует из уравнения (1), необходимая длительность $\tau_{p,ToF}$, а соответственно энергия зондирующих импульсов увеличивается с увеличением дальности R , что существенно ограничи-

вает дальность действия TOF-лидара при приемлимых весогабаритных характеристиках и энергетическом потенциале.

В соответствии с предлагаемым методом длительность зондирующих импульсов τ_p определяется в виде [2]

$$\tau_p \geq 2\xi_{max}/C, \quad (2)$$

где ξ_{max} – максимальная глубина рельефа поверхности заданного класса объектов.

При этом, в отличие от ToF технологии «Range gated imagers», одновременное определение $\tau_i(S, t)$, а соответственно и $\xi_i(S)$, на множестве элементов N поверхности S основано на получении двумерных распределений энергии $B_1(S)$ – «алгоритм 1» или $B_2(S)$ – «алгоритм 2», а также $B_0(S)$ на усеченных по времени реализациях отраженного светового поля $E(S, t)$ путем одновременного накопления заряда отраженного поля $E(S, t)$ во всех N пикселях фотоматрицы в пространственно – временном стробе с длительностью, равной длительности лазерных импульсов $\tau_{s1} = \tau_{s2} = \tau_p$. Причем накопление зарядов осуществляют на интервале $(t_1, t_1 + \tau_p)$ для поля, который включает часть реализации отраженного поля с передним фронтом $B_1(S)$, или на интервале $(t_1 + \tau_p, t_1 + 2\tau_p)$ – для части реализации поля с задним фронтом $B_2(S)$, а также распределение энергии для полной реализации отраженного сигнала $B_0(S)$, т. е. на интервале $(t_1, t_1 + 2\tau_p)$, где t_1 – момент времени, соответствующий началу прихода отраженного сигнала по отношению к моменту излучения лазерного импульса t_0 .

В результате преобразования выходных сигналов пикселей получаем 2D-распределения энергии поля отраженного излучения $E(S, t)$ [3, 4]:

$$\begin{aligned} B_1(S) &= |E_i(S)|^2 \int_{t_1}^{t_1+\tau_p} f^2(t - \tau_i) dt = \\ &= |E_i(S)|^2 (\tau_p - \tau_i), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} B_2(S) &= |E_i(S)|^2 \int_{t_1+\tau_p}^{t_1+2\tau_p} f^2(t - \tau_i) dt = \\ &= |E_i(S)|^2 \tau_i, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} B_{0i}(S) &= |E_i(S)|^2 \int_{t_1}^{t_1+2\tau_p} f^2(t - \tau_p) dt = \\ &= |E_i(S)|^2 \tau_p. \end{aligned} \quad (5)$$

Согласно уравнений (3)–(5) энергии парциальных пучков, отраженных от одного и того же i -того элемента поверхности ΔS_i соответственно равны:

$$B_{1i} = P_i F_{pi} (\tau_p - \tau_i) = P_i K_i T_{ai} A_i (\tau_p - \tau_i), \quad (6)$$

$$B_{2i} = P_i F_{pi} \tau_i = P_i K_i T_{ai} A_i \tau_i, \quad (7)$$

$$B_{0i} = P_i F_{pi} \tau_p = P_i K_i T_{ai} A_i \tau_p, \quad (8)$$

где P_i – мощность падающего лазерного излучения на i -тый элемент поверхности объекта ΔS_i с коэффициентом отражения K_i ; F_{pi} – оператор преобразования для i -того парциального пучка.

Получение информации о рельефе поверхности объекта в виде рельефометрических сигнатур дальностных объектов $\xi_i(S)$ обеспечивается путем определения отношений энергий в виде $B_1(S)/B_0(S)$ или $B_2(S)/B_0(S)$.

Согласно уравнений (6)–(8), отношения энергий i -тых парциальных пучков, отраженных от одного и того же i -того элемента поверхности ΔS_i с коэффициентом отражения K_i определены в виде:

$$B_{1i}/B_{0i} = (\tau_p - \tau_i)/\tau_p, \quad (9)$$

$$B_{2i}/B_{0i} = \tau_i/\tau_p. \quad (10)$$

Искомые параметры τ_i , ξ_i определяем из (9) – «алгоритм 1» или (10) – «алгоритм 2»:

$$\tau_i = \tau_p [1 - (B_{1i}/B_{0i})],$$

$$\xi_i = 0,5C\tau_i = 0,5C\tau_p [1 - (B_{1i}/B_{0i})]. \quad (11)$$

$$\tau_i = \tau_p (B_{2i}/B_{0i}),$$

$$\xi_i = 0,5C\tau_i = 0,5C\tau_p (B_{2i}/B_{0i}). \quad (12)$$

С учетом уравнений (11), (12) рельефометрическая сигнатура поверхности объекта $\xi_i(S)$ по алгоритмам 1 и 2 определяется уравнениями (13), (14) соответственно:

$$\xi(S) = 0,5C\tau_p [1 - (B_1(S)/B_0(S))], \quad (13)$$

$$\xi(S) = 0,5C\tau_p [B_2(S)/B_0(S)]. \quad (14)$$

Коэффициент повышения эффективности использования энергии лазерного излучения n_R в предлагаемом методе определяется отношением уравнений (1) к (2)

$$n_R = \tau_{p,TOF}/\tau_p = R_{max}/\xi_{max}. \quad (15)$$

Из данного уравнения следует, что при равной энергии зондирующих импульсов $E_{TOF} = P_{0,TOF}\tau_{p,TOF} = E_p = P_{0,p}\tau_p$ импульсная мощность лазерных импульсов $P_{0,p}$ по предлагаемой методологии в n_R раз больше момента времени, соответствующий началу прихода отраженного сигнала по отношению к моменту излучения лазерного импульса t_0 .

В результате преобразования выходных сигналов пикселей получаем 2D распределения энергии поля отраженного излучения $E(S, t)$ [3, 4]:

$$\begin{aligned} B_1(S) &= |E_i(S)|^2 \int_{t_1}^{t_1+\tau_p} f^2(t - \tau_i) dt = \\ &= |E_i(S)|^2 (\tau_p - \tau_i), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} B_2(S) &= |E_i(S)|^2 \int_{t_1+\tau_p}^{t_1+2\tau_p} f^2(t - \tau_i) dt = \\ &= |E_i(S)|^2 \tau_i, \end{aligned} \quad (4)$$

$$B_{0i}(S) = |E_i(S)|^2 \int_{t_1}^{t_1 + 2\tau_p} f^2(t - \tau_p) dt = |E_i(S)|^2 \tau_p. \quad (5)$$

Согласно уравнений (3)–(5) энергии парциальных пучков, отраженных от одного и того же i -того элемента поверхности ΔS_i соответственно равны:

$$B_{1i} = P_i F_{pi} (\tau_p - \tau_i) = P_i K_i T_{ai} A_i (\tau_p - \tau_i), \quad (6)$$

$$B_{2i} = P_i F_{pi} \tau_i = P_i K_i T_{ai} A_i \tau_i, \quad (7)$$

$$B_{0i} = P_i F_{pi} \tau_p = P_i K_i T_{ai} A_i \tau_p, \quad (8)$$

где P_i – мощность падающего лазерного излучения на i -тый элемент поверхности объекта ΔS_i с коэффициентом отражения K_i ; F_{pi} – оператор преобразования для i -того парциального пучка.

Получение информации о рельефе поверхности объекта в виде рельефометрических сигнатур дальностных объектов $\xi_i(S)$ обеспечивается путем определения отношений энергий в виде $B_1(S)/B_0(S)$ или $B_2(S)/B_0(S)$.

Согласно уравнений (6)–(8), отношения энергий i -тых парциальных пучков, отраженных от одного и того же i -того элемента поверхности ΔS_i с коэффициентом отражения K_i определены в виде:

$$B_{1i}/B_{0i} = (\tau_p - \tau_i)/\tau_p, \quad (9)$$

$$B_{2i}/B_{0i} = \tau_i/\tau_p. \quad (10)$$

Искомые параметры τ_i , ξ_i определяем из (9) – «алгоритм 1» или (10) – «алгоритм 2»:

$$\tau_i = \tau_p [1 - (B_{1i}/B_{0i})],$$

$$\xi_i = 0,5C\tau_i = 0,5C\tau_p [1 - (B_{1i}/B_{0i})]. \quad (11)$$

$$\tau_i = \tau_p (B_{2i}/B_{0i}),$$

$$\xi_i = 0,5C\tau_i = 0,5C\tau_p (B_{2i}/B_{0i}). \quad (12)$$

С учетом уравнений (11), (12) рельефометрическая сигнатура поверхности объекта $\xi_i(S)$ по алгоритмам 1 и 2 определяется уравнениями (13), (14) соответственно:

$$\xi(S) = 0,5C\tau_p [1 - (B_1(S)/B_0(S))], \quad (13)$$

$$\xi(S) = 0,5C\tau_p [B_2(S)/B_0(S)]. \quad (14)$$

Коэффициент повышения эффективности использования энергии лазерного излучения n_R в предлагаемом методе определяется отношением уравнений (1) к (2)

$$n_R = \tau_{p,TOF}/\tau_p = R_{max}/\xi_{max}. \quad (15)$$

Из данного уравнения следует, что при равной энергии зондирующих импульсов $E_{TOF} = P_{0,TOF}\tau_{p,TOF} = E_p = P_{0,p}\tau_p$ импульсная мощность лазерных импульсов $P_{0,p}$ по предлагаемой методологии в n_R раз больше мощности лазерных им-

пульсов $P_{0,TOF}$, чем по ToF-технологии, т. е. $P_{0,p} = n_R P_{0,TOF} = (R_{max}/\xi_{max}) P_{0,TOF}$, так как длительность зондирующего импульса τ_p (2) с увеличением расстояния R в n_R раз меньше длительности зондирующего импульса $\tau_{p,TOF}$ (1). Учитывая квадратичную зависимость дальности действия лидара R_{max} от мощности зондирующих импульсов для протяженных объектов с диффузным отражением, коэффициент увеличения дальности K_R по сравнению с TOF – технологией пропорционален $\sqrt{n_R}$, т. е.

$$K_R = \sqrt{n_R} = \sqrt{R_{max}/\xi_{max}}. \quad (16)$$

Для точечных объектов коэффициент K_R пропорционален $\sqrt[4]{n_R}$ т. е.

$$K_R = \sqrt[4]{n_R} = \sqrt[4]{R_{max}/\xi_{max}}. \quad (17)$$

Так, например, для класса протяженных объектов с максимальной глубиной рельефа поверхности до $\xi_{max} = 3$ м (например, бронетехника), что соответствует наиболее крупным объектам в задачах обнаружения и распознавания малоразмерных объектов, и расположенных даже на сравнительно небольшом расстоянии от лидара, например $R_{max} = 300$ м, $K_R = \sqrt{300/3} = 10$, т. е. дальность действия лидара по нашей технологии при прочих равных условиях составит $R'_{max} = K_R R_{max} = 3$ км.

Согласно уравнений (16), (17), чтобы обеспечить такую дальность R'_{max} в ToF-лидаре мощность его излучения для протяженных объектов должна быть увеличена в $K_R^2 = n_R = 100$ раз, так как длительность зондирующего импульса $\tau_{p,TOF}$ составляет $\tau_{p,TOF} = 100\tau_p$; соответственно для точечных объектов мощность излучения должна быть увеличена в $K_R^4 = 10000$ раз.

Литература

1. Analysis of ways to improve the efficiency of ground-based optoelectronic observation complexes [In Russian Federation] / V. N. Baloev [et al.] // Optl J. – 2012. – V. 9 (3). – P. 22–32.
2. Ivanov, V. I. Investigation of the effect of noise parameters of 3D lidar on the error in estimating relief signatures of distant objects from 2D field intensity distributions of reflected radiation / V. I. Ivanov, N. I. Ivanov // Quantum Electronics. – 2020. – V. 50 (11). – P. 1068–1073.
3. Ivanov, V. I. Methodological aspects of creating a 3d lidar for obtaining relief-metric signatures of small-sized objects based on 2d distributions of the intensity of reflected radiations / V. I. Ivanov // Journal of Applied Spectroscopy. – 2024. – V. 91, № 1. – P. 110–118.
4. Ivanov, V. I. Methodology and algorithms for obtaining long-range 3D portraits of objects based on 2D intensity distributions of truncated realizations of reflected laser radiation / V. I. Ivanov // Computer Optics. – 2024. – V. 48, № 3. – P. 386–396.
5. Time of Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications / M. Hansard [et al.]. – Springer, 2012.