

Метод стереометрической лазерной локации на основе стробируемых гибридных электронно-оптических преобразователей

В.И. Иванов, Н.И. Иванов

НИИ ядерных проблем Белорусского государственного
университета, Минск
E-mail: ivanov.inp@gmail.com

Приоритетным направлением повышения эффективности обнаружения и распознавания различных удаленных объектов, включая малоконтрастные объекты и объекты с нулевой контрастностью, является создание трехмерных лазерных локаторов (3D-лидаров), обеспечивающих получение дальностных стереометрических изображений объектов [1, 2].

Полагаем, что лоцируемую поверхность объекта, находящуюся на расстоянии h от лидара, облучают расходящимся лазерным излучением, импульсами прямоугольной формы с почти плоской волной и длительностью

$$\tau_{\text{и}} \geq \frac{2\xi_{\text{в.мах}}(\vec{r}_1)}{c}, \quad (1)$$

где $\xi_{\text{в.мах}}(\vec{r}_1)$ – максимальное возвышение рельефа поверхности; c – скорость света.

Длительность импульса отраженного светового поля $E(\vec{S}, t)$ равна

$$T = \tau_{\text{и}} + \frac{\xi_{\text{в.мах}}(\vec{r}_1)}{c} = \tau_{\text{и}} + \tau_{\text{ф.мах}}(\vec{S}, t), \quad (2)$$

где $\vec{S}$ – вектор в плоскости изображения; $\vec{r}_1$ – вектор в предметной плоскости; $\tau_{\text{ф.мах}}(\vec{S}, t)$ – максимальная длительность фронта отраженного поля.

В рамках данной модели отраженный сигнал $E_k(\vec{r}_1, t)$ можно представить совокупностью k парциальных пучков (субпучков), отраженных от k точек поверхности в радиальном направлении. Под парциальным пучком понимаем лазерное излучение, попадающее на один элемент (пиксель) гибридного электронно-оптического преобразователя (ГЭОП), представляющего собой ЭОП сопряженный с ПЗС или КМОП матрицей. Временное распределение запаздывания времени прихода $\tau_k(\vec{S}, t)$ каждого из субпучков относительно момента излучения лазерного импульса t_0 однозначно связано с распределением возвышений рельефа $\xi_{\text{в}}(\vec{r}_1)$ поверхности объекта. В соответствии с алгоритмом метода регистрируется два двумерных распределения интенсивности N парциальных пучков $B_1(\vec{S})$, $B_2(\vec{S})$ отраженного светового поля с использованием стробируемых ГЭОП. При этом распределение $B_1(\vec{S})$ должно обя-

зательно включать передний или задний фронт отраженного поля. В частности, для участка реализации $E(\vec{S}, t)$, содержащего передний фронт поля, распределение $B_1(\vec{S})$ получаем путем двумерного накопления поля $E(\vec{S}, t)$ в пространственно – временном стробе ГЭОП длительностью

$$\tau_{c.1} = t_2 - t_1, \quad (3)$$

где t_1 – момент начала прихода отраженного светового поля; $2\xi_{s.max}(\vec{r}_1)/c \leq t_2 \leq \tau_{и}$.

В соответствии с (3) и (4) $B_1(\vec{S})$ определяется уравнением

$$B_1(\vec{S}) = K(\vec{r}_1, t) T_a(\vec{S}, t) A(\vec{S}) |E_k(\vec{S})|^2 \times \\ \times \int_{t_1}^{t_2} f^2(t_2 - \tau'_k) dt = K(\vec{r}_1, t) T_a(\vec{S}, t) A(\vec{S}) |E_k(\vec{S})|^2 (t_2 - \tau'_k), \quad (4)$$

где $K(\vec{r}_1, t)$ – функция распределения коэффициента отражения поверхности объекта; $T_a(\vec{S}, t)$ – передаточная функция среды переноса лазерного излучения по трассе локации (атмосфера, гидросфера); $A(\vec{S})$ – аппаратная передаточная функция лоатора (лидара).

Второе распределение $B_2(\vec{S})$ получаем путем двумерного накопления полной реализации поля $E(\vec{S}, t)$ по всей длительности его реализации T :

$$B_2(\vec{S}) = K_{отр}(\vec{r}_1, t) T_a(\vec{S}, t) A(\vec{S}) |E_k(\vec{S})|^2 \int_{t_1}^{t_1+T} f^2(t - \tau'_k) dt = \\ = K_{отр}(\vec{r}_1, t) T_a(\vec{S}, t) A(\vec{S}) |E_k(\vec{S})|^2 \tau_{и}. \quad (5)$$

Нетрудно видеть, что двумерное распределение $B_2(\vec{S})$ представляет собой полутоновое изображение лоцируемого объекта с селекцией фона обратного рассеяния. Из отношения (4) и (5) получаем двумерное распределение временных сдвигов N парциальных пучков отраженного излучения в следующем виде:

$$\tau(\vec{S}) = t_2 - \tau_{и} B_1(\vec{S})/B_2(\vec{S}). \quad (6)$$

Отсюда, получаем распределение искомым возвышений лоцируемого объекта (рельеф) на множестве N точек его поверхности

$$\xi_b(\vec{r}_1) = c/2(t_2 - \tau_{и} B_1(\vec{S})/B_2(\vec{S})), \quad (7)$$

а также расстояний $R_\xi(\vec{r}_1)$ до каждой из точек возвышений в виде

$$R_\xi(\vec{r}_1) = R_6 + \xi_b(\vec{r}_1), \quad (8)$$

где $R_6 = R_{\xi_{max}}$ – базовое расстояние, определяемое путем измерения длительности временного интервала $t_1 - t_0$, как расстояние до точки поверхности с максимальным возвышением.

Экспериментальная проверка разрешающей способности ξ_r проводилась на тест – объектах с размерами 80×80 см со ступеньчатым калиброванным профилем возвышений и $\xi_{k_{max}} = 30$ см на расстояниях до 1 км; коэффициент диффузного отражения $0,24 \div 0,3$; длительность импульсов лазерного излучения $\tau_p = 30$ нс; динамический диапазон ГЭОП $D_d \approx 90$; дискретная размерность панорамы (поля) анализа в предметной плоскости $N = 128 \times 128$ элемента. Полученные экспериментальные оценки среднеквадратичного значения погрешности в диапазоне возвышений $\xi_k(\vec{r}_1) = 0 \div 30$ см на $N \approx 1,6 \times 10^4$ точек поверхности тест-объекта по 10 измерениям, составили $\sigma_\xi \leq 7$ мм. На рис. 1 представлены гистограммы плотности вероятности распределения абсолютных значений погрешности $\pm \Delta \xi$ для 100 измерений: а) $+\Delta \xi$; б) $-\Delta \xi$.

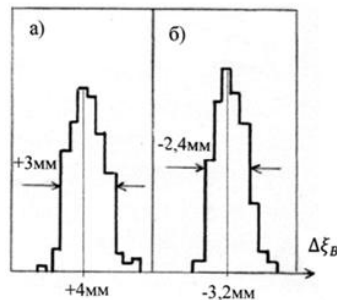


Рис.1. Гистограммы плотности вероятности распределения абсолютных значений погрешности $\pm \Delta \xi_{в}$

Данный метод стереометрической лазерной локации позволяет одновременно определять распределение возвышений (рельефа) $\xi_{в}(\vec{r}_1)$ на множестве N точек поверхности объекта. Погрешность определения $\xi_{в}(\vec{r}_1)$ определяется только инструментальной погрешностью, а именно, ошибками измерения $t_1, \tau_u, B_1(\vec{S}), B_2(\vec{S})$. При этом время получения дальностных 3D – изображений по сравнению с лазерно-локационными системами поточечного сканирования, основанными на времяпролетных или фазовых измерениях, уменьшается более чем в N раз, где размерность N может составлять десятки тысяч единиц.

1. Грязнов Н.А., Купренюк В.И., Соснов Е.Н. Лазерная информационная система сближения и стыковки космических аппаратов // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 2. С. 27–33.
2. Иванов В.И., Иванов Н.И. Получение дальностных 3D изображений высокودинамичных объектов по отношениям интенсивностей парциальных пучков отраженного лазерного излучения // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. №7. С. 679–682.