

Получение дальностных 3D изображений высокодинамичных объектов по отношениям интенсивностей парциальных пучков отраженного лазерного излучения

В.И.Иванов, Н.И.Иванов

Рассмотрены методические аспекты получения дальностных трехмерных изображений высокодинамичных объектов по отношениям интенсивностей парциальных пучков отраженного лазерного излучения. Предлагаемый метод, наряду с изображениями объектов, одновременно обеспечивает получение данных об их рельефе с высоким разрешением на множестве точек поверхности за моноимпульсный цикл локации. Высокая разрешающая способность и быстродействие метода обуславливают эффективность его применения для обнаружения и распознавания удаленных высокодинамичных объектов, включая малоразмерные объекты, по их 3D характеристикам.

Ключевые слова: 3D лидар, 3D изображения, 3D камеры.

1. Введение

Появление нового поколения малогабаритных импульсных лазеров и высокочувствительных многоэлементных фотодетекторов, а также возрастающая потребность в специальных видах новой техники стимулировали разработки в области лазерно-локационных систем для эффективного обнаружения, сопровождения и распознавания высокодинамичных объектов в различных средах [1–6]. Алгоритмы функционирования большинства таких систем основаны на получении дальностных трехмерных изображений объектов. Решение данной задачи существенно усложняется для высокодинамичных объектов, что обуславливает необходимость разработки и совершенствования высокоскоростных методов получения и обработки дальностных 3D изображений. В настоящей статье исследуется модифицированный алгоритм метода лазерной 3D локации по отношениям интенсивностей парциальных пучков излучения в двумерных распределениях интенсивности отраженного поля и проводится оценка потенциальных возможностей использования этого метода для получения дальностных 3D изображений высокодинамичных объектов. Базовая концепция метода была впервые предложена нами в работах [7,8], а сам метод впервые использовался в [9–11].

2. Теория

Для упрощения дальнейшего изложения мы полагаем, что поверхность лоцируемого объекта, находящегося на расстоянии R_{01} от лидара, облучается расходящимся лазерным излучением с импульсами прямоугольной формы. Длительность зондирующих импульсов должна удовлетворять условию

$$\tau_p > 2\xi_{\max}(r_1)/c, \quad (1)$$

где $\xi_{\max}(r_1)$ – максимальное значение возвышения рельефа поверхности объекта; c – скорость света.

Схема геометрии метода 3D локации представлена на рис.1. Координаты в плоскости изображения оптической системы (ОС) лидара введены таким образом, чтобы между координатами x, y точек лоцируемой поверхности и координатами x, y ее паракиального изображения существовала простая связь:

$$S = \beta r_1, \quad (2)$$

где $\beta = d/R_{01}$ – коэффициент увеличения приемной ОС лидара; d – расстояние от линзы ОС до плоскости изображе-

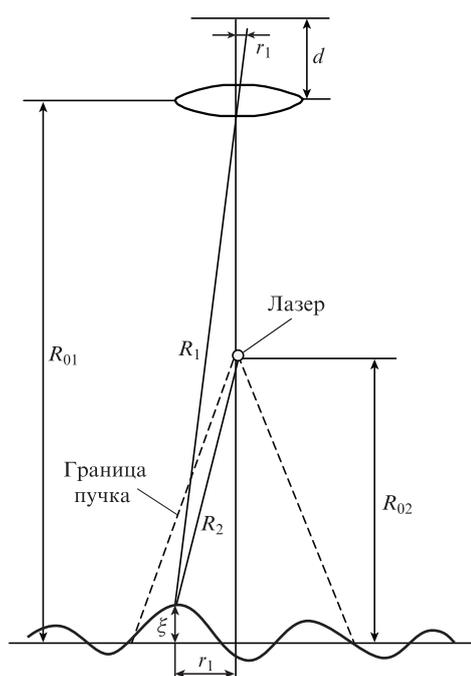


Рис.1. Схема геометрии метода 3D локации.

В.И.Иванов, Н.И.Иванов. Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Беларусь, 220030 Минск, ул. Бобруйская, 11; e-mail: ivanov.inp@gmail.com

Поступила в редакцию 16 января 2018 г., после доработки – 15 февраля 2018 г.

ния, в которой установлен двумерный детектор изображений с накоплением заряда; \mathbf{S} – радиус-вектор в плоскости изображения лидара; \mathbf{r}_1 – радиус-вектор в предметной плоскости.

С учетом малой длительности лазерных импульсов состояние лоцируемого объекта на трассе локации можно считать «замороженным». Для диффузно рассеивающей поверхности объекта амплитуда светового поля в плоскости изображения приемной оптики определяется как сумма амплитуд полей, отраженных от отдельных точек поверхности в направлении ОС:

$$E(\mathbf{S}) = \sum_k E_k(\mathbf{S}), \quad (3)$$

где $E_k(\mathbf{S})$ – амплитуда поля в изображении k -й точки поверхности. Суммирование осуществляется по всем k облучаемым точкам поверхности, попадающим в поле зрения системы. Интенсивность (освещенность) в плоскости изображения приемной оптики определяется квадратом модуля выражения (3):

$$I(\mathbf{S}) = \left| \sum_k E_k(\mathbf{S}) \right|^2 = \sum_k |E_k(\mathbf{S})|^2 + \sum_{k \neq i} E_k^*(\mathbf{S}) E_i(\mathbf{S}). \quad (4)$$

Первая сумма в (4) представляет собой сумму интенсивностей излучений, отраженных от отдельных точек поверхности, в то время как вторая сумма описывает интерференцию полей этих излучений в изображениях. Для описания пространственно-временной структуры излучаемых и отраженных световых полей введем функцию $f(t) > 0$, которая отлична от нуля на интервале времени, равном длительности импульса лазерного излучения τ_p , и имеет максимальное значение, равное единице. Поэтому амплитуду поля падающего на лоцируемую поверхность лазерного излучения можно представить в виде

$$E_0(\mathbf{r}_1, t) = f(t - \tau) E_0(\mathbf{r}_1), \quad (5)$$

где $E_0(\mathbf{r}_1)$ – распределение комплексной амплитуды поля лазерного излучения на поверхности; τ – время распространения лазерного импульса до точки поверхности с координатой \mathbf{r}_1 . Теперь по аналогии с (4) пространственно-временная структура светового поля в плоскости изображения приемной оптики будет определяться так:

$$I(\mathbf{S}, t) = \sum_k f^2(t - \tau_k) |E_k(\mathbf{S})|^2 + \sum_{k \neq i} f(t - \tau_k) f(t - \tau_i) E_k^*(\mathbf{S}) E_i(\mathbf{S}), \quad (6)$$

где $\tau_k = (R_1 + R_2)/c$ – время прохождения лазерным импульсом трассы локации при отражении его от k -й точки поверхности (рис.1).

В случае малого угла зрения приемной оптики лидара ($r_1/R_0 \ll 1$) величины R_1 и R_2 можно с достаточной степенью точности представить в виде

$$R_1 \approx R_0 - \xi(\mathbf{r}_1) + r_1^2/(2R_0), \quad R_2 \approx R_0 - \xi(\mathbf{r}_1) + r_1^2/(2R_0). \quad (7)$$

Для совмещенной оптической схемы лидара излучение лазерных импульсов и прием отраженных сигналов осуществляются практически в одной точке, на расстоянии R_0 от лоцируемой поверхности. В этом случае $R_1 \approx R_2$, а

$R_0 \approx R_0 = R_0$. С учетом данных соотношений и формулы (7) время τ_k прихода сигнала, отраженного от возвышения $\xi_k(\mathbf{r}_1)$ поверхности в некоторой точке k , определяется выражением

$$\tau_k = \tau_0 - 2\xi_k(\mathbf{r}_1)/c + r_1^2/(cR_0), \quad (8)$$

где $\tau_0 = (R_0 + R_0)/c = 2R_0/c$ – время прихода отраженного сигнала, соответствующее невозмущенному шероховатости уровню лоцируемой поверхности ($\xi = 0$).

Для параметра $\tau'_k = \tau_0 - \tau_k$ из выражения (8) при условии $r_1^2/(cR_0) \ll 1$ имеем соотношение $\tau'_k = 2\xi_k(\mathbf{r}_1)/c$. Отраженный сигнал $E_k(\mathbf{r}_1, t)$ в плоскости изображения лидара формируется совокупностью k элементарных волн, отраженных от k точек поверхности, в виде $E_k(\mathbf{S}, t)$. При этом параметр τ'_k характеризует временной сдвиг прихода каждой из k отраженных элементарных волн $E_k(\mathbf{r}_1, t)$ лазерного излучения относительно времени τ_0 и однозначно связан с возвышениями рельефа поверхности ξ_k в точках k . Распределение временных сдвигов прихода элементарных волн на многоэлементный фотодетектор, расположенный в плоскости изображения ОС, имеет вид

$$\tau'_k(\mathbf{S}, t) = 2\xi_k(\mathbf{r}_1)/c. \quad (9)$$

Максимальное значение временного сдвига $\tau'_{k \max}(\mathbf{S}, t)$ определяется следующим образом:

$$\tau'_{k \max}(\mathbf{S}, t) = 2\xi_{k \max}(\mathbf{r}_1)/c. \quad (10)$$

Время t_1 прихода отраженного светового поля на фотодетектор определяется временем прихода сигнала, отраженного от точки поверхности с максимальным возвышением рельефа $\xi_{k \max}(\mathbf{r}_1)$. В соответствии с соотношениями (8) и (10) для t_1 получаем выражение

$$t_1 = \tau_0 - \tau'_{k \max}(\mathbf{S}, t) = 2R_0/c - 2\xi_{k \max}(\mathbf{r}_1)/c = \tau_{k \min}, \quad (11)$$

где $\tau_{k \min} = t_1 - t_0$ – интервал времени между моментом прихода сигнала t_1 и моментом посылки лазерного импульса t_0 (в данном случае можно считать $t_0 = 0$).

Отраженное световое поле, проецируемое на 2D фотодетектор лидара, который состоит из $N = N_x N_y$ элементов, можно представить в виде совокупности полей N парциальных пучков. Под парциальным пучком понимается отраженное лазерное излучение, попадающее на один элемент (пиксель) 2D фотодетектора ОС. Каждый из парциальных пучков характеризуется своей интенсивностью и временным сдвигом $\tau'_k(\mathbf{S}, t)$ в соответствии с (9), а их число N определяет требуемое пространственное разрешение в предметной плоскости.

Рассмотрим 2D пространственное распределение интенсивности (изображение) $B_1(\mathbf{S})$. Распределение $B_1(\mathbf{S})$ получаем путем накопления интенсивности за время, меньшее длительности реализации T отраженного светового поля $E(\mathbf{S}, t)$, включающей в себя передний или задний фронт поля. В частности, для участка реализации $E(\mathbf{S}, t)$, содержащего передний фронт поля, распределение $B_1(\mathbf{S})$ находим путем накопления интенсивности отраженного светового поля $E(\mathbf{S}, t)$ каждого парциального пучка в пространственно-временном стробе τ_{s1} , длительность и временное положение которого задаются выражением

$$\tau_{s1} \geq t_2 - t_1 = \tau'_{k \max} + \Delta\tau, \quad (12)$$

где $t_2 = t_1 + \tau'_{k\max} + \Delta\tau$; $\Delta\tau$ – временной интервал, определяющий вносимую неопределенность зоны отсечки требуемого участка реализации поля $E(\mathbf{S}, t)$ из-за флуктуаций длительности и временного положения стробирующего импульса τ_{s1} в аппаратной реализации.

При высоком разрешении ОС, когда интерференционной суммой в (6) можно пренебречь, распределение интенсивности отраженного светового поля $B_1(\mathbf{S})$ имеет вид

$$\begin{aligned} B_1(\mathbf{S}) &= K(\mathbf{r}_1, t) T_a(\mathbf{S}, t) A(\mathbf{S}) |E_k(\mathbf{S})|^2 \int_{t_1}^{t_2} f^2(t_2 - \tau'_k) dt \\ &= K(\mathbf{r}_1, t) T_a(\mathbf{S}, t) A(\mathbf{S}) |E_k(\mathbf{S})|^2 (t_2 - \tau'_k), \end{aligned} \quad (13)$$

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

Множитель $|E_k(\mathbf{S})|^2 (t_2 - \tau'_k)$ в уравнении (13) содержит информацию о распределении возвышений поверхности $\xi_k(\mathbf{r}_1)$. Однако неизвестные в большинстве случаев функции $K(\mathbf{r}_1, t)$ и $T_a(\mathbf{S}, t)$ вносят большую погрешность в вычисление абсолютных значений $\xi_k(\mathbf{r}_1)$. Для возможности определения $\xi_k(\mathbf{r}_1)$ в условиях априорной неопределенности функций $K(\mathbf{r}_1, t)$ и $T_a(\mathbf{S}, t)$ получаем второе распределение $B_2(\mathbf{S})$ путем 2D накопления поля $E(\mathbf{S}, t)$ за время его полной реализации $T = \tau_p + \tau'_{k\max}$. При этом длительность каждого парциального пучка отраженного излучения с высокой степенью точности равна длительности лазерного импульса τ_p . В связи с этим распределение $B_2(\mathbf{S})$ имеет вид

$$\begin{aligned} B_2(\mathbf{S}) &= K(\mathbf{r}_1, t) T_a(\mathbf{S}, t) A(\mathbf{S}) |E_k(\mathbf{S})|^2 \int_{t_1}^{t_1+T} f^2(T - \tau'_{k\max}) dt \\ &= K(\mathbf{r}_1, t) T_a(\mathbf{S}, t) A(\mathbf{S}) |E_k(\mathbf{S})|^2 \tau_p. \end{aligned} \quad (14)$$

Нетрудно видеть, что распределение $B_2(\mathbf{S})$ представляет собой 2D изображение лоцируемого объекта с селекцией фона сигнала обратного рассеяния.

Из отношений полученных интенсивностей парциальных пучков в распределениях $B_1(\mathbf{S})$ и $B_2(\mathbf{S})$ находим распределение временных сдвигов $\tau'_k(\mathbf{S})$ прихода каждого из N парциальных пучков отраженного излучения в виде

$$\tau'_k(\mathbf{S}) = t_2 - \tau_p B_1(\mathbf{S}) / B_2(\mathbf{S}). \quad (15)$$

Отсюда с учетом (9) получаем распределения на множестве N точек поверхности лоцируемого объекта искомым возвышений рельефа

$$\xi_k(\mathbf{r}_1) = (c/2)[t_2 - \tau_p B_1(\mathbf{S}) / B_2(\mathbf{S})], \quad (16)$$

а также расстояний $R_\xi(\mathbf{r}_1)$ до точек возвышений

$$R_\xi(\mathbf{r}_1) = R_b + \xi_k(\mathbf{r}_1), \quad (17)$$

где R_b – базовое расстояние, определяемое по длительности интервала $t_1 - t_0$ как расстояние до точки поверхности с максимальным возвышением в соответствии с (11), а именно: $R_b = c(t_1 - t_0)/2 = c\tau_{k\min}/2$.

Регистрация изображений $B_1(\mathbf{S})$ и $B_2(\mathbf{S})$ может осуществляться различного рода многоэлементными фотодетекторными каналами (ФДК), реализующими функцию накопления заряда: ПЗС, включая ПЗС с внутренним усилением; матрицами лавинных фотодиодов с элементами накопления заряда; гибридными электронно-оптическими преобразователями (ЭОП), представляющими собой ЭОПы, сопряженные с ПЗС-камерами.

Для измерения базового расстояния R_b могут применяться различные известные методы времяпролетной дальнометрии с пороговым обнаружением момента времени прихода отраженного сигнала t_1 .

3. Результаты расчетов и экспериментов

Как следует из уравнений (16) и (17), при высоком разрешении ОС лидара погрешность определения абсолютных значений $\xi_k(\mathbf{r}_1)$ и $R_\xi(\mathbf{r}_1)$ зависит только от инструментальной погрешности, а именно от ошибок измерения величин t_2 , τ_p , $B_1(\mathbf{S})$, $B_2(\mathbf{S})$.

Разрешающая способность ξ_r определения возвышения рельефа является основным параметром в 3D локации. Уравнение для оценки ξ_r получено нами в виде

$$\xi_r = \xi_{k\max} / D_d + c\Delta\tau / (2D_d), \quad (18)$$

где D_d – динамический диапазон линейной области чувствительности ФДК.

Как следует из выражения (18), разрешающая способность ξ_r улучшается с увеличением D_d и достигает наилучшего значения при минимизации $\Delta\tau$ ($\Delta\tau \rightarrow 0$ в (12)).

ФДК на базе ПЗС и гибридных ЭОПов пятого поколения с электронным возбуждением ПЗС позволяют обеспечить наиболее широкий динамический диапазон $D_d \geq 10^3$, а для гибридных ЭОПов с люминесцентным экраном $D_d \approx (0.8 - 1.5) \times 10^2$. Оценка разрешающей способности ξ_r по формуле (18) при $D_d = 500$ и максимальном возвышении рельефа поверхности $\xi_{k\max} = 3$ м, характерном для задач распознавания большинства воздушных, наземных и подводных объектов, составляет ~ 6 мм.

Экспериментальное определение разрешающей способности ξ_r проводилось на тест-объектах размером 80×80 см со ступенчатым калиброванным профилем возвышений с $\xi_{k\max} = 30$ см на расстояниях до 1 км. Коэффициент диффузного отражения объекта был равен 0.24–0.3; длительность импульсов лазерного излучения $\tau_p = 30$ нс; тип использованного ФДК – ЭОП с микроканальной пластиной и люминесцентным экраном, сопряженный с ПЗС-матрицей; динамический диапазон ФДК $D_d \approx 90$; дискретная размерность поля анализа в предметной плоскости $N = 128 \times 128$ элементов. Полученные по 10 измерениям экспериментальные оценки среднеквадратичной погрешности σ_ξ в диапазоне возвышений $\xi_k(\mathbf{r}_1) = 0 - 30$ см на $N \approx 1.6 \times 10^4$ точках поверхности тест-объекта составили не более 7 мм. На рис.2 представлены гистограммы плотности вероятности распределения абсолютных значений погрешности $\pm\Delta\xi$ для 100 измерений.

Пространственное разрешение r_r в плоскости тест-объекта площадью 6400 см² было равно ~ 0.4 см². При этом время получения дальностных 3D изображений по сравнению с лазерно-локационными системами поточечного сканирования, основанными на времяпролетных или фазовых измерениях, уменьшалось более чем в N раз.

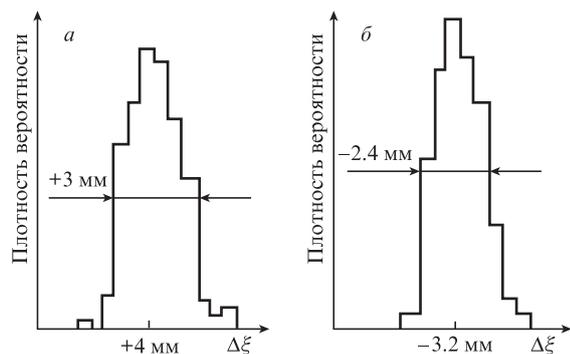


Рис.2. Гистограммы плотности вероятности распределения абсолютных значений погрешности $+\Delta\xi$ (а) и $-\Delta\xi$ (б).

Рассматриваемый метод позволяет определять распределения возвышений рельефа $\xi_k(\mathbf{r}_1)$ на большом множестве N точек поверхности объекта, которое может составлять десятки и сотни тысяч точек в зависимости от числа одновременно детектируемых парциальных пучков отраженного лазерного излучения. Современные матричные детекторы для видимого и ближнего ИК диапазонов содержат миллионы пикселей, поэтому число N , определяющее число указанных пучков и, следовательно, быстродействие и пространственное разрешение в предметной плоскости, ограничивается только дифракционными явлениями и энергетическим потенциалом лидара, требования к которому при заданной дальности зондирования возрастают с увеличением N .

4. Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о высокой разрешающей способности и быстродействии метода получения дальностных 3D изображений по отношениям интенсивностей парциальных пучков отраженного лазер-

ного излучения. Высокая точность и быстродействие, а также возможность реализации метода на отечественной элементной базе обуславливают перспективность его применения для повышения эффективности обнаружения и распознавания широкого класса высокодинамичных воздушных, подводных и наземных объектов по их 3D характеристикам при решении ряда целевых задач [1–6], включая задачи обнаружения противодесантных решетчатых и сетчатых подводных заграждений. Этот метод может также применяться в вертолетных системах обнаружения проводов электролиний, в системах автоматизированной посадки различных летательных аппаратов на неровную поверхность, в диагностике параметров мелко-масштабных поверхностных волн на морской поверхности и в ряде других задач.

1. Катенин В.А. *Экспертный союз*, 6 (30), 25 (2012).
2. Щербаков В.В. *Обозрение армии и флота*, 3 (46), 46 (2013).
3. *Военное применение лазеров*. Под ред. А.С.Борейшо (СПб: Балт. гос. тех. ун-т, 2015, с. 103).
4. Карасик В.Е., Орлов В.М. *Локационные лазерные системы видения* (М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2013, с. 478).
5. Wood J.J., Randall P.N., Nicholas M.R., Nothard J.M., Watson G.H., Harvey C., Smith G. *Proc. SET 130. NATO Military Sensing Symposium* (Orlando, USA, 2008, p. 147).
6. Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П., Тарасенков М.В. *Оптика атмосферы и океана*, 30 (4), 285 (2017).
7. Иванов В.И. Патент SU 1593429 A1, G01S17/00. Приоритет от 04.01.1988.
8. Иванов В.И. Патент SU 1591621 A1, G01C3/08. Приоритет от 11.04.1988.
9. Иванов В.И. В сб.: *Методы и средства дистанционного зондирования Земли и обработки космической информации в интересах народного хозяйства* (Рязань, 1989, ч. 1, с. 39)
10. Иванов В.И. В сб.: *Проблемы комплексной автоматизации гидрофизических исследований* (Севастополь, 1989, с. 171).
11. Иванов В.И. В сб.: *Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстротекающих процессов* (М., 1989, с. 114).