

**ЛАЗЕРНЫЕ ЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ  
3-D ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНЫХ  
ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ С ФУНКЦИЕЙ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ**

В.А. Кочкин, А.В. Бондаренко, М.Г. Князев, К.А. Ядчук

**THE LASER LOCATION SYSTEMS FOR THE FORMATION  
OF 3-D IMAGES WITH SHORT-WAVE INFRARED RANGE  
MATRIX PHOTODETECTOR DEVICES (MPD) WITH THE RANGE  
DETERMINATION FUNCTION BY MEASUREMENT OF TIME  
OF REGISTRATION RADIATION ARE CONSIDERED**

V.A. Kochkin, A.V. Bondarenko, M.G. Knyazev, K.A. Yadchuk

**Аннотация.** Рассмотрены лазерные локационные системы формирования 3-D изображений с матричными фотоприемными устройствами (МФПУ) коротковолнового ИК-диапазона с функцией определения дальности посредством измерения времени регистрации излучения. Основной особенностью МФПУ является возможность регистрации информации о дальности до объекта, формируемой параллельно для каждого чувствительного элемента МФПУ. Показано влияние параметров МФПУ на диапазон определяемых дальностей и точность их определения.

**Ключевые слова:** лазерная локационная система, матричное фотоприемное устройство, дальностный портрет.

**Abstract.** The laser location systems for the formation of 3-D images with short-wave infrared range matrix photodetector devices (MPD) with the range determination function by measurement of time of registration radiation are considered. The main feature of the MPD is the ability to register information about the distance to the object, formed in parallel for each sensitive element of the MPD. The influence of the MPD parameters on the range of determined distances and the accuracy of their determination are shown.

**Keywords:** laser location system, matrix photodetector, long-range portrait.

Возможность обнаружения, распознавания и идентификации удаленных объектов в оптическом диапазоне является важной практической задачей, для решения которой в настоящее время широко используются оптико-электронные системы, работающие в пассивном (преимущественно тепловизионные) и полуактивном (телевизионные) режиме. Однако эти системы, не имея собственного источника подсвета, не обеспечивают получение 3-D координатной информации об объектах и фонах. Первым этапом решения данной проблемы явилось использование систем с активно-

импульсными преобразователями изображений [1, 2], обеспечивающих формирование дальностных портретов наблюдаемой области пространства посредством последовательного формирования изображений, стробируемых по дальности, при импульсном подсвете лазерным излучением (ЛИ). Существенными недостатками, свойственными данному классу локаторов формирования 3-D изображений, являются недостаточное разрешение по дальности, определяемое длительностью импульса подсвета  $T_u$  и быстродействием стробируемого фотоприемного устройства (ФПУ), преимущественно ЭОП.

В настоящее время за рубежом и в России [3-6] активно развивается направление разработки матричных ФПУ, в которых структура обработки зарегистрированного сигнала с каждого чувствительного элемента (ч.э.) содержит схему измерения времени прихода отраженного от элемента наблюдаемой области пространства, однозначно связанной с дальностью до него при сохранении функции формирования обычного яркостного портрета (2D-изображения).

Данный класс МФПУ активно развивается на основе полупроводниковых гетероструктур  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$  коротковолнового ИК-диапазона спектра и позволяет реализовать новый класс перспективных лазерных локационных систем формирования 3D изображений (3-DЛЛС) в ближнем ИК-диапазоне. Их особенностями являются возможность получения в моноимпульсном режиме 3D-изображений высокого разрешения в широком диапазоне изменения дальностей.

В России МФПУ данного типа разработано НПО «Орион» [4, 7] и выполнено на базе тройного соединения  $In_xGa_{1-x}As/InP$ . Данный состав при  $x = 0,53$  обеспечивает высокую чувствительность в спектральном диапазоне ближнего ИК диапазона 0,9-1,7 мкм и не требует дополнительного охлаждения.

Возможность работы МФПУ в режимах формирования дальностного портрета (ДП) и 2-D изображений обеспечивается структурой параллельной независимой обработкой фотодетектированного сигнала в каждом ч.э.

Для работы в режиме формирования ДП активируется высокочастотный (ВЧ)-канал, состоящий из последовательно подключенных к выходу усилителя фототока чз ВЧ-фильтра, компаратора, RC-триггера, управляющего ключом, на вход которого подается линейно-изменяющийся сигнал  $U_R$  с крутизной  $dU_R/dt$ . ВЧ-канал стробируется управляющим сигналом  $GATE$ , определяющим временной интервал его работы: начало интервала соответствует минимальной измеряемой дальности, а окончание – максимальной  $D_{max}$ .

В момент приема отраженного ЛИ в ч.э. возникает импульсное напряжение фототока  $U_\phi$  с длительностью  $T_\phi \approx T_u$ . Сигнал фототока после

прохождения через ВЧ-фильтр поступает на неинвертирующий вход компаратора, и при амплитуде больше управляемого порогового напряжения на время действия импульса фототока выход компаратора переключается из высокого логического состояния в низкое. При этом выход QRS-триггера также переключается в инверсное состояние и размыкает ключ, с выхода которого на накопительную емкость НЧ-канала поступает сигнал дальности  $U_d$ , равный значению линейно изменяющегося (для определенности линейно-нарастающего) напряжения  $U_R$  в момент времени  $t_2 = t_1 + t_{3AD} = t_1 + 2D/cn$ , где  $t_1$  – момент начала линейного роста  $U_R$ ;  $D$  – дальность до элемента лоцируемой области пространства,  $c$  – скорость света,  $n$  – показатель преломления среды распространения излучения [4].  $U_d = U_0 + t_{3AD} dU_R/dt$ .

При работе в режиме формирования 2-D изображений ВЧ-канал строится, а в НЧ-канале происходит накопление усиленного сигнала фототока  $U_\phi$  на накопительной емкости.

По окончании регистрации изображения сигналы с накопительных емкостей всех ч.э. МФПУ последовательно считываются, формируя выходной видеосигнал, несущий информацию о ДП или 2-D изображении лоцируемой области пространства.

ООО «Растр Технолоджи» был реализован фотоприемный модуль, обеспечивающий реализацию функционала данного МФПУ. ФПМ выполнен на базе ЦАП разрядностью 16 бит, частотой дискретизации до 1.6 ГГц для формирования сигнала  $U_R$  с последующим усилением, рассчитанным на работу с емкостной нагрузкой. Оцифровка данных осуществлялась с помощью прецизионного малошумящего АЦП разрядностью 18 бит. Оптический старт от лазера осуществляется по одномодовому волокну через быстродействующий фотодиод с полосой частот до 10 ГГц. Для управления МФПУ и связи с устройствами ЗДЛЛС применена ПЛИС семейства Cyclone IV.

Внешний вид ФПМ приведен на рисунке.



*Внешний вид ФПМ*

При проектировании 3D ЛЛС с использованием ФПМ на основе МФПУ рассмотренного выше типа необходимо учитывать энергетические, геометрические и шумовые характеристики МФПУ. Основные характеристики МФПУ, определяющие параметры 3D-ЛЛС на их основе, связаны с ее чувствительностью, количеством и размерами ч.э. и разрешением по дальности. Формат МФПУ порядка 320x256 ч.э. определяет связь реализуемого поля зрения ЛЛС с разрешением по поперечным координатам и сравним с используемыми в пассивных оптико-электронных системах. Чувствительность МФПУ находится на уровне p.i.n. фотодиодов, поэтому основные ограничения связаны с реализуемым разрешением МФПУ по дальности.

Рассмотрим влияние разрешения по дальности канала МФПУ на параметры 3D-ЛЛС.

Разрешение по дальности  $\sigma_d$  определяется через временное разрешение  $\sigma_t$  – ошибку определения времени задержки  $t_{3дл}$  как  $\sigma_D = 0,5 \text{ сн } \sigma_t$ .

На точность измерения времени задержки влияют скорость нарастания сигнала фототока и шум на входе компаратора.

Первое проявляется в том, что при интегрировании импульса фототока с длительностью  $T_\phi$  момент достижения сигналом  $U_\phi$  уровня порогового напряжения *компаратора* зависит от скорости нарастания данного сигнала, определяемой мощностью принимаемого ЛИ, и может быть минимизирован посредством оптимального выбора минимального отношения сигнал/шум для регистрируемого ДП, что обеспечивается за счет повышения мощности формируемого ЛИ.

Шумовая компонента проявляется в виде временной неопределенности момента достижения сигналом  $U_\phi$  уровня порогового напряжения компаратора при нарастании сигнала фототока. СКО этой величины представляет предел временного разрешения, обеспечиваемого МФПУ в режиме сильного сигнала  $\sigma_t$ .

Величина временного разрешения  $\sigma_t$  может быть определена как

$$\sigma_t = \sigma_U \cdot (dU_R/dt)^{-1},$$

где  $\sigma_U$  – среднеквадратичное отклонение напряжения шума на выходе ячейки МФПУ, измеренное при регистрируемом с вероятностью, близкой к 100 %, сигнале дальности при постоянной крутизне сигнала  $U_R$ .

При этом максимальное значение дальности, измеряемой с требуемым разрешением  $\sigma_D$ ,  $D_{max0} = \sigma_D \cdot U_{Rmax} / \sigma_U$ , где  $U_{Rmax}$  – диапазон линейного изменения сигнала  $U_R$ .

При характерных для МФПУ значениях  $U_{Rmax} = 1,6 \text{ В}$  и  $\sigma_D = 0,3 \text{ м}$  при  $\sigma_U = 2 \text{ мВ}$  [4] величина  $D_{max0}$  составляет 240 м.

Сочетание требований большого диапазона измерения дальности и высокой разрешающей способности является противоречивым и существенно ограничивает возможный диапазон измеряемых дальностей. В связи с этим для разработки 3-ДЛЛС с увеличенным динамическим диапазоном изменения дальности предложено использовать многоэтапный алгоритм формирования 3-D изображения лоцируемой области пространства.

Пусть требуемое значение максимальной измеряемой дальности  $D_{max} > D_{max0}$ .

Тогда на первом этапе в первом цикле локации формируется 2D изображение  $\{g_{i,j}\}_1$ , а на втором цикле – дальностный портрет – изображение  $\{f_{i,j}\}$  с разрешением по дальности  $\sigma_{D1} = D_{max}\sigma_U / U_{Rmax} > \sigma_D$  и использованием сигнала  $U_R$  с крутизной  $(dU_R/dt)_1 = cnU_{Rmax} / 2D_{max}$ . По зарегистрированному изображению проводится селекция элементов изображения  $f_{ij}$  по дальности и разделение изображения на фрагменты  $\{f_{i,j}^k\}$ , соответствующие областям, группируемым вокруг наиболее вероятных значений дальности:

$$\{f_{i,j}^k\} : \forall (i,j) \in f^k \quad |D_{i,j} - D_{max}^k| \leq D_{max0}, \quad k = 1 \dots K,$$

где  $D_{max}^k$  – локальные максимумы распределения дальностей до элементов сформированного изображения,  $D_{i,j}$  – дальность до  $(i,j)$ -ого элемента изображения,  $K = \text{int}(D_{max}/D_{max0} + 1)$ .

Одновременно проводится совместный анализ областей ДП  $\{f_{i,j}^k\}$  и 2D-изображения  $\{g_{i,j}\}_1$  с целью сегментации и предварительного выделения областей  $\{S_{i,j}\}$ , обладающих свойством связности как по дальности, так и по поперечным координатам.

В подавляющем большинстве практически интересных задач эти области соответствуют отдельным компонентам фоно-целевой обстановки, например, воздушным объектам и удаленному фону.

На втором этапе проводится локация анализируемой области пространства с требуемым разрешением  $\sigma_D$ , при этом сигнал  $U_R$  формируется с крутизой  $(dU_R/dt)_k = cnU_{Rmax} / 2D_{max0}$  со сдвигом начала линейного роста в каждом цикле на момент времени  $t_{1k} = 2D_{min}^k / cn$ , где  $D_{min}^k = \min_{\{f_{i,j}^k\}} D_{i,j}$  – минимальное по  $k$ -ому фрагменту изображения значение дальности. Данный этап занимает  $K$  циклов локации. По его оконча-

нии формируется суммарный дальностный портрет  $\{f_{i,j}^{\Sigma}\} = \bigcup_{m=1}^K \{f_{i,j}^k\}$ .

После его формирования регистрируется 2-D изображение анализируемой области пространства  $\{g_{i,j}\}_2$ , синтезируется 3-D изображение и окончательно выделяются связные области  $\{S_{i,j}\}$  для дальнейшей обработки и решения задач обнаружения, распознавания и идентификации объектов [8, 9].

Предложенный алгоритм работы 3D-ЛЛС позволяет формировать 3-D изображения лоцируемой области пространства с требуемым разрешением по дальности в широком диапазоне изменения дальности до объектов и фона при сохранении высокого разрешения по поперечным координатам. Данный алгоритм может быть использован при разработке лазерных локационных систем и систем формирования трехмерных изображений удаленных объектов.

#### Библиографический список

1. Грузевич Ю.К. Оптико-электронные приборы ночного видения. М.: Физматлит, 2014.
2. Карасик В.Е., Орлов В.М. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 478с.
3. Бурлаков И.Д., Гринченко Л.Я., Дирочка А.И., Залетаев Н.Б. Детекторы коротковолнового ИК-диапазона на основе InGaAs (обзор) // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
4. Бурлаков И.Д., Кузнецов П.А., Мощев И.С., Болтарь К.О., Яковлева Н.И. Матричный фотоприемный модуль на основе гетероструктуры InGaAs/InP для формирователей ЭБ-изображений в коротковолновом ИК-диапазоне // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 383.
5. M. Laurenzis, F. Christnacher, D. Monnin Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping // Optics Letters. Vol. 32, Issue 21, pp. 3146-3148 (2007).
6. A. Halimi, A. McCarthy, M. Laurenzis, F. Christnacher, G.S. Buller, R. Tobin. Three-dimensional single-photon imaging through obscurants// OPTICS EXPRESS, Vol. 27, No. 4, 18 Feb 2019, p. 4590.
7. Яковлева Н.И., Болтарь К.О. Быстродействующие матрицы фотодиодов на основе двойных гетероструктур InGaAs-InGaAlAs-InAlAs и их характеристики // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 66.
8. Бондаренко А.В., Докучаев И.В., Ядчук К.А., Бондаренко М.А., Дрынкин В.Н. Пространственно-временная фильтрация движущихся изображений // Техническое зрение. 2014. Вып. 1(5). С. 32–38. URL: <http://magazine.technicalvision.ru/spatio-temporal-filtering-of-moving-images/>

9. Кочкин В.А., Лоскутов В.Ю. Выделение динамических объектов при компенсации смещения фона в последовательности неоднородных динамических изображений // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Сер. Технические науки. Информационные технологии. 2016. № 6 (34). С. 61-72.

**Кочкин Василий Алексеевич**  
НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва, Россия

**Бондаренко А.В.**  
ООО «Растр Технолоджи»,  
г. Москва, Россия

**Князев М.Г.**  
ООО «Растр Технолоджи»,  
г. Москва, Россия

**Ядчук К.А.**  
ООО «Растр Технолоджи»,  
г. Москва, Россия

**Kochkin V.A.**  
NII RET MSTU  
them. N.E. Bauman,  
Moscow, Russia

**Bondarenko A.V.**  
“Rastr TECHNOLOGI»,  
Moscow, Russia

**Knyazev M.G.**  
“Rastr TECHNOLOGI»,  
Moscow, Russia

**Yadchuk K.A.**  
“Rastr TECHNOLOGI»,  
Moscow, Russia