

УДК 621.396

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-146-151

## Метод статистической обработки сигналов в фотоприемном устройстве лазерного дальномера

Е.А. Борисов, А.С. Жабин

Рассмотрены существующие и перспективные решения для определения параметров воздушной цели (расстояние и скорость) с помощью лазерного локатора, реализованные в фотоприемных устройствах, находящихся в составе оптико-локационных станций, устанавливаемых на борту военных самолетов.

Приведена функциональная схема оптического приемника и поясняется принцип его действия. Представлены экспериментальные исследования шумов в оптическом приемнике и аппроксимация его закона распределения. Подробно проанализирован алгоритм статистической обработки сигналов, состоящий из двух этапов: локализации местоположения цели и уточнения ее параметров по накопленным массивам данных о принимаемых смесях сигнал/шум. Данный алгоритм заложен в программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), интегрированную в схему фотоприемного устройства. Даны результаты моделирования предложенного алгоритма, из которых сделан вывод о выигрыше от его использования по сравнению с применяющимся в настоящее время способом определения расстояния до цели.

*Ключевые слова:* отношение сигнал/шум, метод статистической обработки сигналов, фотоприемное устройство.

*Для цитирования:* Борисов Е.А., Жабин А.С. Метод статистической обработки сигналов в фотоприемном устройстве лазерного дальномера // Вестник МЭИ. 2018. № 5. С. 146—151. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-146-151.

## Statistical Signal Processing Method in the Laser Rangefinder's Photodetector

E.A. Borisov, A.S. Zhabin

The article discusses existing and advanced solutions for determining the air target parameters (distance and speed) by means of a laser radar, specifically, those implemented in the photodetectors used as part of the optical radar stations installed on board of military aircrafts.

The optical receiver's functional diagram is given, and the principle of its operation is explained. Experimental investigations of optical receiver noise and approximation of its distribution law are presented. The statistical signal processing algorithm is discussed in detail. The algorithm includes two stages: (i) determining the target location and (ii) refining its parameters from the collected data arrays on the receiving signal/noise mixes. This algorithm is incorporated into the FPGA integrated in the photodetector circuit. The algorithm simulation results are presented, and a conclusion has been drawn from them about the gains from using the developed algorithm in comparison with the currently used ranging method.

*Key words:* signal-to-noise ratio, statistical signal processing method, photodetector.

*For citation:* Borisov E.A., Zhabin A.S. Statistical Signal Processing Method in the Laser Rangefinder's Photodetector. MPEI Vestnik. 2018;5:146—151. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-146-151.

В современной военной технике и, в частности, в авионике, помимо радиолокаторов для определения расстояния до цели используются лазерные дальномеры. Они отличаются высокой направленностью излучения и точностью.

В последнее время предъявляются все более высокие требования к увеличению дальности действия авиационного лазерного дальномера, что приводит либо к требованиям по увеличению энергетического потенциала системы, либо, если первое невозможно, к разработке новых методов обнаружения и обработки отраженного от цели сигнала. В [1] описан способ увеличения дальности определения цели за счет увеличения отношения сигнал/шум с задержкой строба открывания затвора приемника, чтобы не накапли-

вать мощность фонового излучения. При использовании данного метода принимать смесь сигнала и шума можно только с определенного интервала расстояний. Сигналы от объектов, расположенных вне заданного интервала, отсекаются. В [2] предлагается снизить расходимость лазерного излучения передатчика, использовать устройства управления световым потоком, содержащиеся в передающем тракте, а также излучать сигнал на длине волны 1,5...1,6 мкм. Но эти решения уже реализованы и на сегодняшний день не актуальны. Еще один интересный способ продемонстрирован в [3], где говорится об оцифровке принятых реализаций и их накоплении в массиве данных и рекомендовано по максимальному накопленному дискрету определять дальность до цели. Однако совершенно не упоминает-

ся о скорости производимых вычислений и о том, какой тип цели анализируется: движущаяся или неподвижная, что делает невозможным применение данного метода в авиационной технике. В [4 — 7] указаны общие сведения о современном уровне развития лазерной дальнометрии, однако конкретных путей решения задачи увеличения дальности действия лазерных дальномеров для авиационной техники нет.

Лазер, находящийся в составе оптико-локационной станции на борту самолета, излучает оптический импульс, который, отражаясь от цели, поступает на входную апертуру фотоприемного устройства (ФПУ) оптико-локационной станции. Упрощенная функциональная схема ФПУ дана на рис. 1. Оптический сигнал проходит через оптический тракт (приемный объектив, светофильтр, устройство фокусировки) на площадку лавинного фотодиода (ЛФД) и с его помощью преобразуется в электрический ток. На приемную площадку ЛФД, помимо полезного сигнала, поступает и мешающая составляющая, обусловленная фоновой засветкой. Наибольший уровень фоновой засветки создает солнечный свет. Фоновая засветка, также как и полезный сигнал, подвергается лавинному умножению, вследствие чего электрический ток, генерируемый ЛФД, состоит из смеси полезной составляющей, обусловленной сигналом, и шумовой составляющей, обусловленной фоновой засветкой, а также шумом лавинного умножения фоновой засветки, сигнала и части темнового тока ЛФД [8, 9]. Смесь сигнала и шума поступает на вход трансимпедансного усилителя (ТИУ), с помощью которого выходной ток ЛФД преобразуется в напряжение. Далее смесь сигнала и шума подается на согласованный фильтр и следующий каскад усиления. Параметры согласованного фильтра оптимизированы с целью получения на его выходе максимального отношения сигнала к шуму. После второго каскада усиления смесь сигнала и шума переходит на вход компаратора, который на выходе (в момент пересечения смесью заданного порога) формирует импульс. На входе компаратора действует смесь сигнала и шума, в которой, помимо указанных выше компонентов шума, присутствует еще и внутренний шум усилительного тракта.

Фиксируя время выстрела лазера и регистрации импульса на выходе компаратора, можно рассчитать

расстояние до цели. Чем дальше находится цель, тем меньше отношение сигнал/шум в принимаемой смеси. Для регистрации отраженного от нее импульса следует снизить величину порога компаратора. В свою очередь, снижение порога ведет к появлению ложных срабатываний, вызванных шумовыми всплесками. При таком раскладе однозначное определение дальности до цели невозможно. Минимально возможный порог, при котором компаратор срабатывает только на сигнал, а не на шум, ограничивает дальность лазерного дальномера оптико-локационной станции.

На борту отечественных боевых самолетов установлены оптико-локационные станции, ФПУ которых регистрируют без ошибок отраженные от воздушной цели сигналы, минимальное отношение сигнал/шум по напряжению которых равно 6. Значение этого параметра обусловлено максимально допустимой вероятностью ложного срабатывания компаратора на всем интервале наблюдения. Величина порога равна минимально возможной амплитуде сигнала и составляет величину, в 6 раз превышающую среднеквадратическое отклонение (СКО) шума. Фотоприемные устройства выполняют свою задачу и позволяют безошибочно определять дальность до цели, однако, из-за требуемого минимального отношения сигнал/шум, обусловленного установленным порогом, они имеют ограничение по дальности обнаружения цели. При этом энергетический потенциал системы позволяет заметно увеличить дальность обнаружения, если получать результат не по факту однократной фиксации импульса, а на основе статистического анализа набора из нескольких реализаций сигнала и шума, что является важной и перспективной задачей, поскольку ее успешное решение качественным образом влияет на технические характеристики оптико-локационных станций.

Одно из решений поставленной задачи — метод статистической обработки сигнала. Его суть заключается в том, что во время ожидания отраженного от цели сигнала на вход компаратора с установленным порогом воздействует смесь сигнала и шума. Если установить порог компаратора ниже пиковых реализаций шума (для повышения чувствительности ФПУ и дальности обнаружения цели), то реализация на выходе компаратора будет представлять собой импульсную последовательность, вызванную пересечением порога

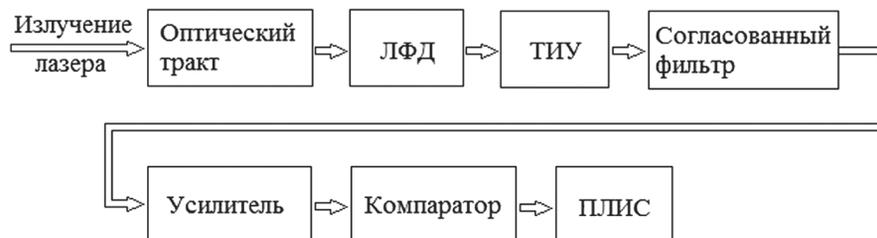


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема ФПУ

компаратора смесью сигнала и шумовых всплесков. В этой реализации присутствуют сигнальный импульс и большое количество (чем ниже значение порога, тем больше) ложных импульсов, обусловленных шумовыми всплесками. Реализация записывается в память ФПУ с дискретом по времени, равным 15,6 нс, что дает приемлемую точность при определении расстояния до цели. После накопления набора (например из 8 штук) реализаций в памяти ФПУ они подвергаются статистической обработке с помощью программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Согласно алгоритму, обработка реализаций проходит в два этапа. На первом этапе по реализациям проводится операция логического ИЛИ. На результирующем отрезке реализации в месте нахождения цели наблюдаются более частые срабатывания компаратора относительно всего отрезка. В результирующем массиве данных идет поиск соседних отсчетов, расстояние между которыми не превышает расстояния между соседними отсчетами, соответствующего движению цели с максимальной скоростью 1326 м/с (4 маха) относительно самолета (в этом случае расстояние между соседними отсчетами равно 19 дискретам по времени). Если, начиная с найденного отсчета, у восьми отсчетов количество соседних расстояний, не превышающих 19 дискретов, более

одного, то принимается решение об обнаружении цели в данной области. С помощью этих данных локализуется область нахождения воздушной цели и в пределах этой области на втором этапе обработки используется метод статистического анализа. Более точные параметры цели определяются путем перебора и анализа вариантов гипотез по дальности и скорости цели с помощью ПЛИС. После каждого выстрела лазера алгоритм перебирает гипотезы дальности и скорости по новой реализации и 7 предыдущим в случае, когда длина набора равна 8. Число реализаций в наборе носит условный характер и определяется удобством схемотехнической реализации метода. При использовании микросхем памяти с восьмиразрядной шиной данных удобно записывать наборы именно из 8 реализаций.

Экспериментальные исследования статистических характеристик смеси шумов фоновой засветки, лавинного умножения фоновой засветки и добавляемого усилительным трактом показали, что итоговый случайный процесс имеет закон распределения, весьма близкий к нормальному. На рис. 2 показана экспериментально полученная осциллограмма шумового напряжения  $U_{ш}(t)$ , подаваемого на вход компаратора, на рис. 3 — его гистограмма и аппроксимация Гауссовой кривой с параметрами  $M = 0$  В,  $\sigma = 5,5 \cdot 10^{-3}$  В, где  $M$  — математическое ожидание;  $\sigma$  — СКО.

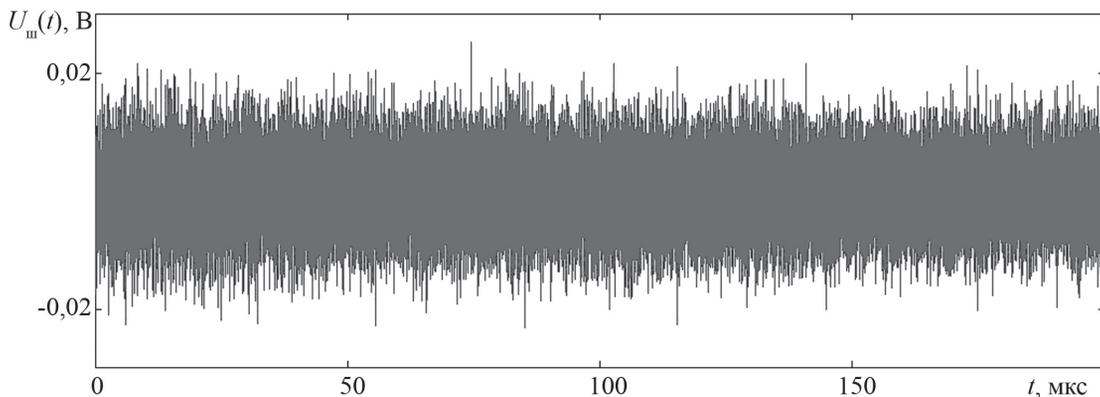


Рис. 2. Осциллограмма шумового напряжения, полученная экспериментально

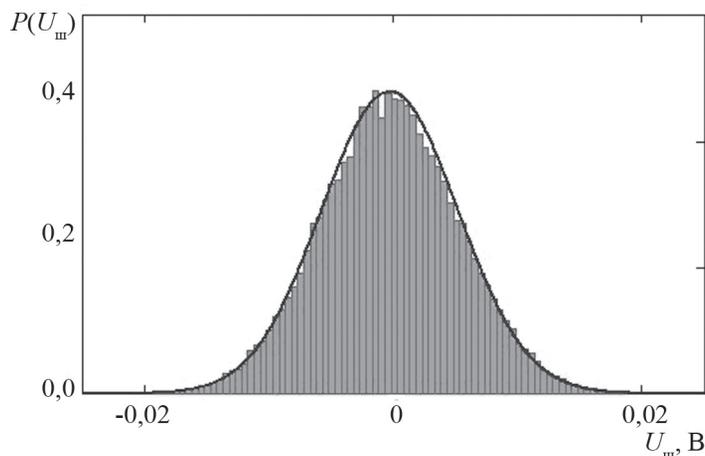


Рис. 3. Гистограмма и аппроксимация Гауссовой кривой

Поскольку шум — случайный процесс, то шумовые импульсы не будут коррелированы между собой, а расположатся в случайных местах равномерно по реализациям. Сигнал от цели в случае верной текущей гипотезы либо присутствует на большинстве из всех реализаций, либо будет отсутствовать на большинстве из реализаций в случае неверной гипотезы. Этот факт позволяет обнаружить сигнал и вычислить параметры цели (скорость, дальность). Перебор гипотез дальности проходит с шагом 2,34 м, по скорости шаг составляет 71 м/с. Шаг по дальности выбирается так, чтобы не пропустить сигнал, 2,34 м соответствуют расстоянию между соседними отсчетами. Шаг по скорости равен ситуации, когда между отсчетами сигнала всех соседних реализаций одинаковое расстояние. Сначала выбирается гипотеза по скорости, затем идет перебор гипотез по дальности, при этом подсчитывается количество срабатываний компаратора. После перебора всех гипотез выбирается комбинация дальности и скорости с наибольшим количеством срабатываний компаратора. Таким образом, происходит определение расстояния до цели и ее скорости.

Имитируя поведение цели, задав расстояние до нее и ее скорость, и проведя моделирование алгоритма статистической обработки сигнала в пакете RAD Studio 10, можно наблюдать, что описанный алгоритм надежно работает с отношением сигнал/шум, равным 4, и величиной порога компаратора в  $3,5\sigma$ .

Моделирование массива данных после операции логической ИЛИ над восемью реализациями выходного сигнала компаратора на первом этапе обработки приведено на рис. 4, а. В окне массива по оси абсцисс отложено время в мкс, соответствующее расстоянию

20 км, а по оси ординат — логические уровни сигнала на выходе компаратора. Видно, что в месте нахождения сигнала имеется большое скопление сигнальных отсчетов, по которым происходит локализация местоположения цели (рис. 4, б).

Результаты моделирования второго этапа обработки изображены на рис. 5. Здесь видны все 8 реализаций, записываемых в память ФПУ, с изображением изменения положения цели согласно заданным параметрам. В этом же окне находятся рассчитанные методом статистической обработки сигнала расстояние до цели и ее скорость. Погрешность определения расстояния составляет  $\pm 1,17$  м, погрешность определения скорости —  $+25...-46$  м/с.

Работа с данным алгоритмом имеет недостаток, связанный с тем, что периодически он дает неправильные значения рассчитанных дальности и скорости из-за того, что реализации шумовых срабатываний при неверной гипотезе по скорости и дальности удовлетворяют критериям, установленным для признания гипотезы верной. Такие ошибки происходят тем чаще, чем ниже заданы порог компаратора и отношение сигнала к шуму. Однако ошибочные результаты можно отсеять, если реализовать функцию, которая на основе правильных данных будет прогнозировать поведение цели, и периодическое относительно нечастое появление неверных значений будет игнорироваться, а на выходе будут только верные данные.

Использование описанного алгоритма позволяет заметно увеличить дальность обнаружения цели, а выигрыш по чувствительности фотоприемного устройства от его использования относительно рабочего способа определения расстояния до цели составляет 42%.

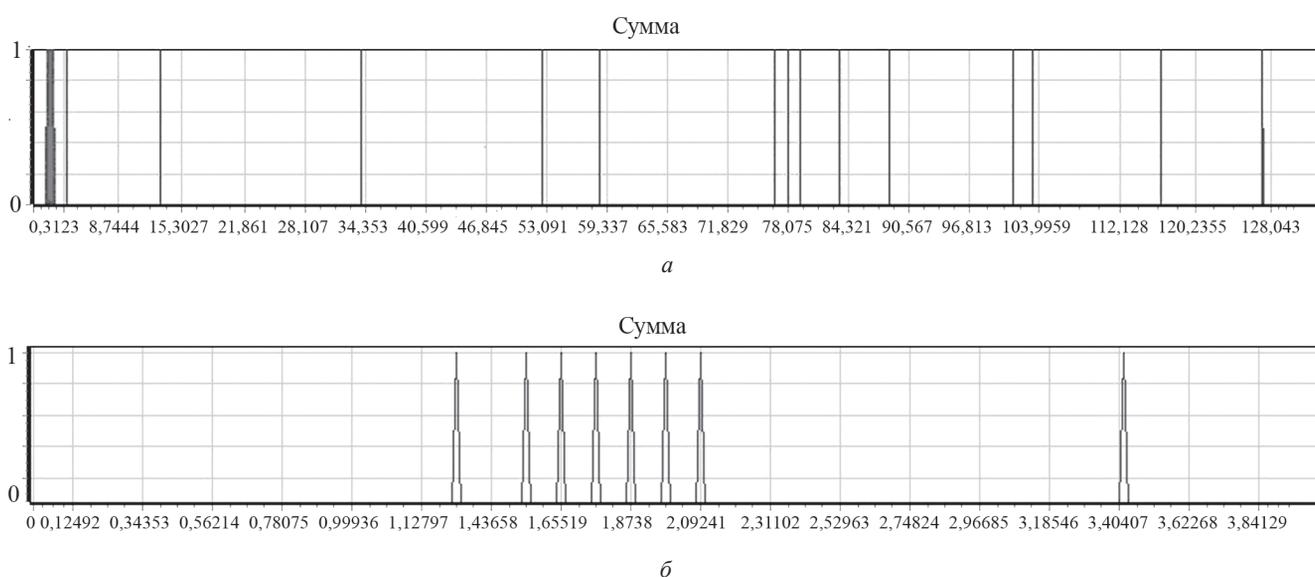


Рис. 4. Логическое ИЛИ 8 реализаций сигналов на выходе компаратора (а) и в увеличенном масштабе (б)

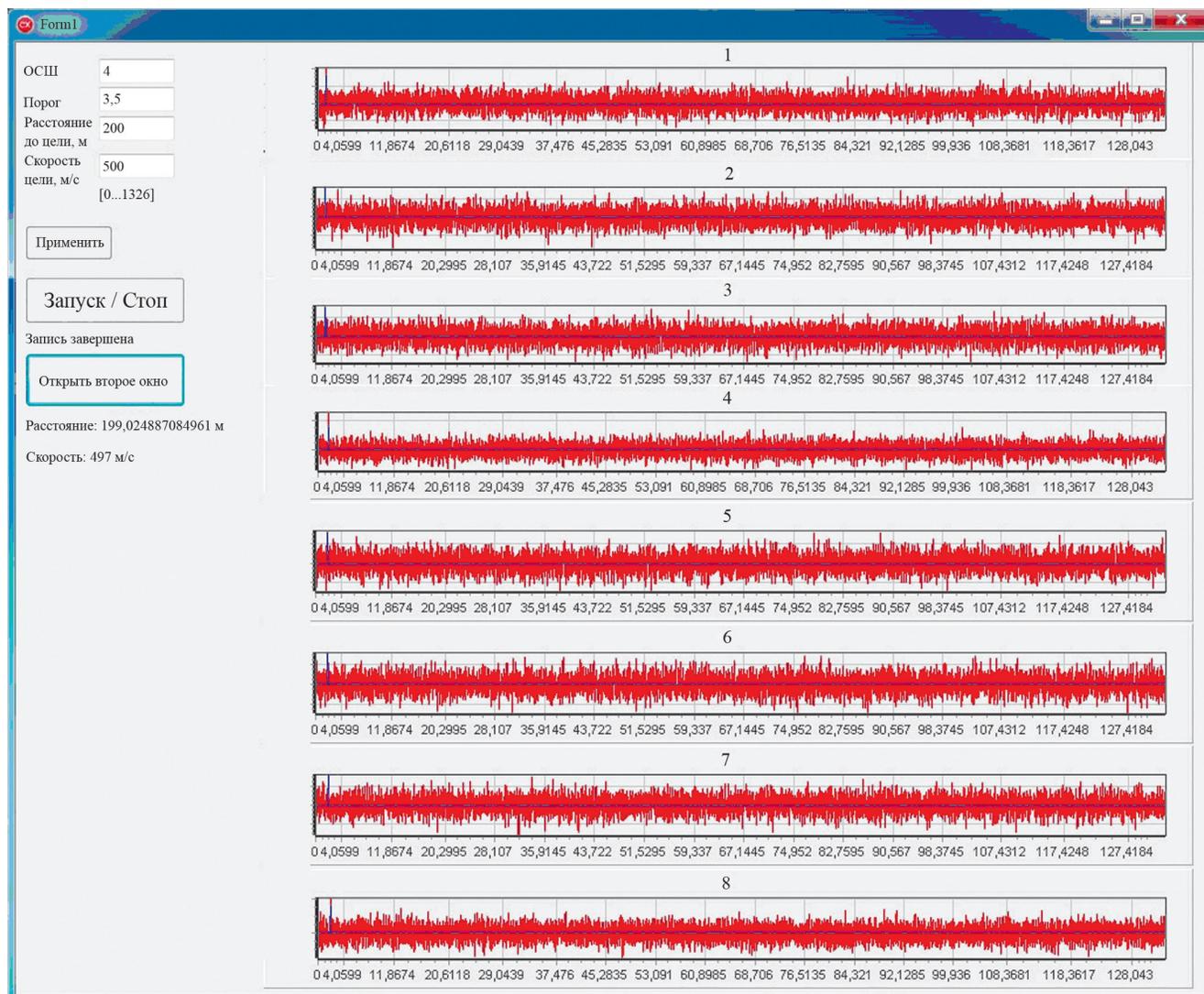


Рис. 5. Основное окно с имитацией поведения сигнала по заданным параметрам и результатами расчета по представленному алгоритму

## Литература

1. Владимиров В.М., Границкий Л.В., Лапухин Е.Г. Оптическая составляющая спутникового лазерного дальномера для многоцветной дальнометрии // Вестник СибГАУ. 2017. Т. 18. № 1. С. 195—204.

2. Антонов А. Сканирующие лазерные дальномеры (LIDAR) // Современная электроника. 2016. № 1. С. 10—15.

3. Васильев В.П. Современное состояние высокоточной лазерной дальнометрии // УФН. 2018. Т. 188. № 7. С. 790—797.

4. Морозов, М.А., Муравьев А.В. Современная лазерная дальнометрия // Новые направления развития приборостроения: Материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов. Минск: Белорусский национ. техн. ун-т, 2016. Т. 2. С. 38.

5. Васильев В.П., Шаргородский В.Д. Современное состояние высокоточной спутниковой лазерной

дальнометрии в России // Фотоника. 2017. № 6 (66). С. 74—85.

6. Честнов И.Ю., Аракелян С.М. Перспективные лазерные технологии. Методические указания для самостоятельной работы студентов. Владимир: ВлГУ, 2014.

7. Шаргородский В.Д. и др. Роль лазерных средств в обеспечении точности системы ГЛОНАСС // Исследования наукограда. 2013. № 3—4. С. 17—27.

8. Technical information SD-28. Characteristics and use of Si APD (Avalanche photodiode). Hamamatsu Photonics K.K., Solid State Division, 2004.

9. User's Guide. Avalanche Photodiodes. Fremont: Perkin Elmer Inc, 2003.

## References

1. Vladimirov V.M., Granitskiy L.V., Lapukhin E.G. Opticheskaya Sostavlyayushchaya Sputnikovogo La-

zernogo Dal'nomeradiya Mnogotsvetnoy Dal'nometrii. Vestnik SibGAU. 2017;18;1:195—204. (in Russian).

2. **Antonov A.** Skaniruyushchie Lazernye Dal'nomery (LIDAR). Sovremennaya Elektronika. 2016;1:10—15. (in Russian).

3. **Vasil'ev V.P.** Sovremennoe Sostoyanie Vysokotochnoy Lazernoy Dal'nometrii. UFN. 2018;188;7:790—797. (in Russian).

4. **Morozov, M.A., Murav'ev A.V.** Sovremennaya Lazernaya Dal'nometriya. Novye Napravleniya Razvitiya Priborostroeniya: Materialy IX Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. Molodykh Uchenykh i Studentov. Minsk: Belorusskiy Natsion. Tekhn. Un-t, 2016;2:38. (in Russian).

5. **Vasil'ev V.P., Shargorodskiy V.D.** Sovremennoe Sostoyanie Vysokotochnoy Sputnikovoy Lazernoy Dal'nometrii v Rossii. Fotonika. 2017;6 (66):74—85. (in Russian).

6. **Chestnov I.Yu., Arakelyan S.M.** Perspektivnye Lazernye Tekhnologii. Metodicheskie Ukazaniya dlya Samostoyatel'noy Raboty Studentov. Vladimir: VIGU, 2014. (in Russian).

7. **Shargorodskiy V.D. i dr.** Rol' Lazernykh Sredstv v Obespechenii Tochnosti Sistemy GLONASS. Issledovaniya Naukograda. 2013;3—4:17—27. (in Russian).

8. **Technical information SD-28.** Characteristics and use of Si APD (Avalanche photodiode). Hamamatsu Photonics K.K., Solid State Division, 2004.

9. **User's Guide.** Avalanche Photodiodes. Fremont: Perkin Elmer Inc, 2003.

---

### Сведения об авторах

---

**Борисов Евгений Александрович** — аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», инженер-исследователь АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», e-mail: mr-jean@yandex.ru

**Жабин Алексей Сергеевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», начальник отдела АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», e-mail: kingofevil@yandex.ru

---

### Information about authors

---

**Borisov Evgeniy A.** — Ph.D.-student of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, Research Engineer of JSC «Research and Production Corporation «Systems of Precision Instrument Making», e-mail: mr-jean@yandex.ru

**Zhabin Aleksey S.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, Head of Department of JSC «Research and Production Corporation «Systems of Precision Instrument Making», e-mail: kingofevil@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 15.03.2018*