

Фотоприемный модуль для регистрации лидарных сигналов в ближней ИК-области

А.И. Надеев, И.Э. Пеннер, Е.С. Шевцов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 26.02.2020 г.

Описана базовая платформа для фотодетекторов, используемых в лидарном комплексе для регистрации обратнорассеянного излучения в ближней ИК-области. Рассмотрены и измерены помехи импульсных высоковольтных DC/DC преобразователей, установленных в фотоприемном модуле. Предложен метод уменьшения помех, генерируемых такими преобразователями. Испытания, проведенные в лидарах Института оптики атмосферы СО РАН, показали эффективность разработанного модуля, предназначенного для регистрации сигналов в аналоговом режиме на длине волны 1,064 мкм.

Ключевые слова: лидар, фотоприемный модуль, лавинный фотодиод, DC/DC преобразователь; lidar, photodetector, avalanche photodiode, DC/DC converter.

Введение

Лидары для дистанционного исследования параметров атмосферы уже давно применяются для мониторинга облачных и аэрозольных полей, малых газовых составляющих и метеопараметров атмосферы [1]. Они работают в широком диапазоне длин волн, от УФ до дальнего ИК, что позволяет регистрировать различные механизмы взаимодействия излучения с многокомпонентной атмосферной средой. Это вызывает необходимость поиска информативных длин волн для различных задач зондирования [2]. Объем информации, получаемой из данных зондирования лидарной системой, определяется не только спектральными и энергетическими характеристиками передатчика, но и квантовой эффективностью фотоприемников в спектральном диапазоне регистрируемого излучения. Для видимого диапазона в лидарах широко используются фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и кремниевые фотодетекторы [3]. Но начиная уже с длин волн ближнего ИК-диапазона (~1 мкм) квантовая эффективность ФЭУ и кремниевых фотодетекторов снижается до единиц процентов. Лидарный сигнал в этом диапазоне регистрируется с помощью стандартных и лавинных фотодиодов [4] с расширенной в область ближнего ИК-диапазона чувствительностью (with enhanced NIR sensitivity). На основе таких фотодетекторов созданы образцы фотоприемных модулей [5].

Для оптимизации лидаров с различными оптическими схемами требуются фотоприемные модули, в которых могут применяться фотодетекторы, отличающиеся

размером активной площадки, напряжением смещения на фотодиоде, устанавливаемой температурой сенсора. Использовать фотоприемные модули, разработанные для конкретного фотодетектора, с другими типами фотодетекторов не представляется возможным.

Нами было принято решение о разработке и создании базового фотоприемного модуля для большой номенклатуры лавинных фотодиодов, в котором регулируются программно и поддерживаются с большой точностью напряжение смещения в диапазоне 50–500 В, а также температура фотодетектора и коэффициент усиления сигнала в широких пределах.

Структура фотоприемного модуля

Для оптимизации затрат на разработку семейства фотоприемников устройства в нем спроектированы по модульному принципу. Часть таких модулей, например блок микропроцессорного управления, источник низковольтного питания, источник высоковольтного питания, интерфейс питания, является общей для всего семейства. Модули съема и усиления сигнала с фотодетектора индивидуальны для разных устройств. На рис. 1 приведена структурная схема фотоприемного устройства на основе лавинного фотодиода (ЛФД).

Это устройство состоит из двух плат-модулей. На первый модуль подается внешнее питающее постоянное напряжение $12 \text{ В} \pm 20\%$. Входной фильтр подавляет помехи, приходящие от внешнего источника питания, а также защищает схему устройства от превышения напряжения и подачи питания неверной полярности. Низковольтный источник питания

* Александр Иванович Надеев (nadeev@iao.ru); Иоганес Эрнстович Пеннер (penner@iao.ru); Егор Сергеевич Шевцов (shevtsoves@mail.ru).

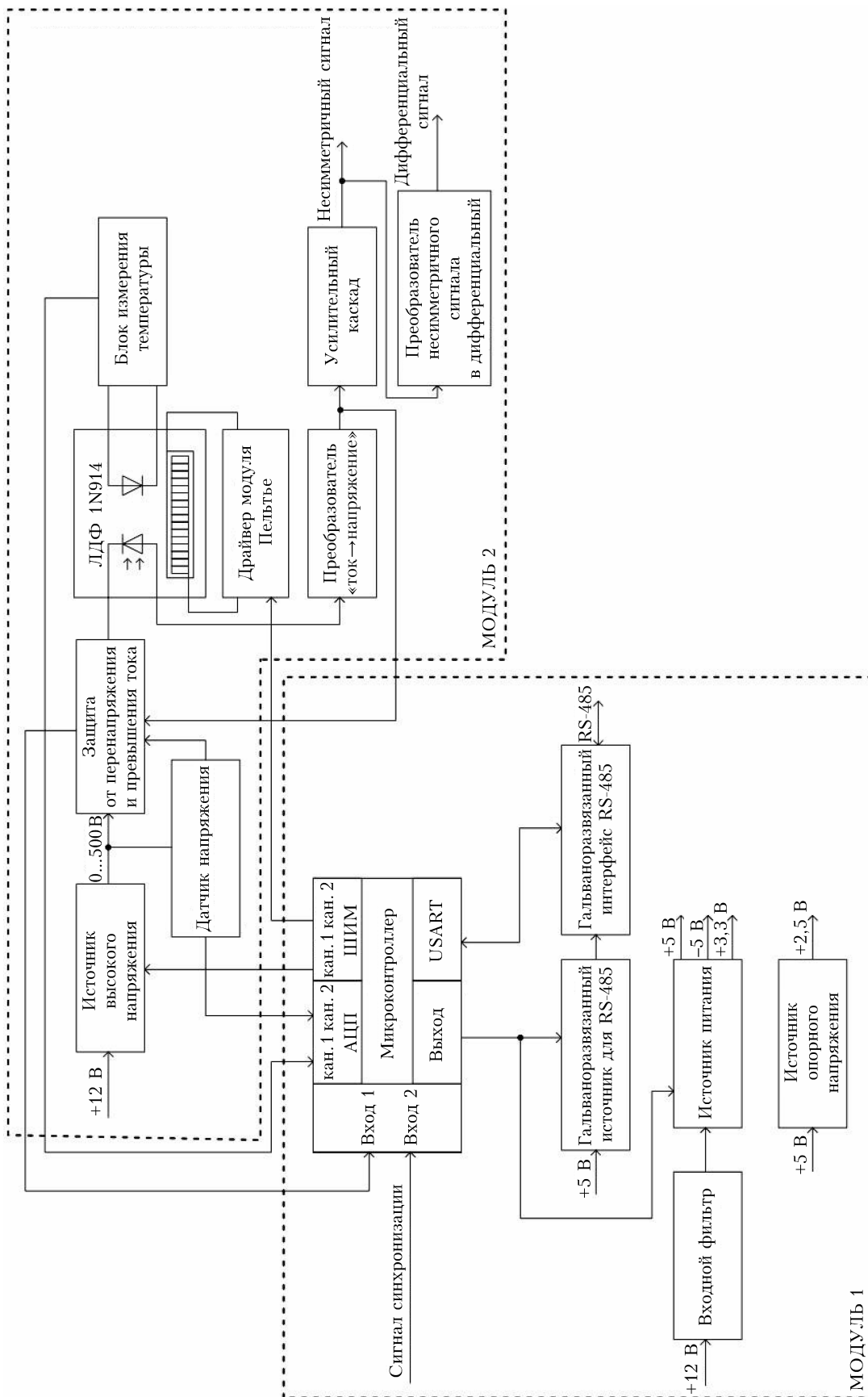


Рис. 1. Структурная схема фотоприемного устройства

преобразует входное напряжение в стабилизированное выходное +5; -5; +3,3 В для работы внутренних схем устройства. Источник опорного напряжения выдает 2,5 В для работы встроенного в микроконтроллер 16-битного сигма-дельта аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

В составе устройства имеется гальваноразвязанный интерфейс связи RS-485 с собственным развязанным источником питания +5 В. Также в состав первого модуля входит микропроцессор, управляющий работой всего устройства.

Источник регулируемого высокого напряжения может вырабатывать напряжение 0–500 (для версии с ЛФД) и 0–1200 В (для версии с ФЭУ). Напряжение с выхода источника снимается с помощью датчика напряжения и подается на вход АЦП микроконтроллера. Регулировка и стабилизация высокого напряжения импульсного преобразователя (DC/DC – Direct Current/Direct Current) осуществляется микроконтроллером по пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) закону посредством изменения скважности широтно-импульсной модуляции (ШИМ). На выходе источника напряжения стоит блок защиты от перенапряжения и превышения тока. Порог срабатывания по напряжению и току устанавливается с помощью потенциометров и не связан с микроконтроллером.

Для регулирования температуры фоточувствительной площадки в конструкцию ЛФД установлен элемент Пельтье, а для измерения его температуры на подложке с кристаллом смонтирован терморезистор, сопротивление которого зависит от температуры и регистрируется блоком измерения последней. Усиленное напряжение поступает на вход АЦП микроконтроллера, который по ПИД-закону рассчитывает скважность модуляции для управления драйвером элемента Пельтье. Для дополнительного контроля температуры фотоприемного модуля и устройства в целом есть возможность подключить внешний модуль Пельтье и вентилятор.

Схема измерения принятого сигнала состоит из преобразователя «ток – напряжение» и усилителя с изменяемым коэффициентом усиления, которым можно управлять с помощью как внешнего сигнала, так и с встроенного в микроконтроллер цифроаналогового преобразователя.

Фотоприемник состоит из отдельных печатных плат-модулей, монтируемых друг на друга с помощью универсального разъема и помещенных в пластиковый корпус размерами 45 × 55 × 25 мм. Общий вид конструкции показан на рис. 2. Конструкция устройства позволяет оперативно менять модули с фотодетекторами, а также наращивать модули для новых функциональных возможностей.

Особенностью устройства является возможность изменять во время работы такие параметры, как напряжение обратного смещения фотодиода и температуру для устройств на базе ЛФД, с помощью внешнего управляющего устройства, например ПК. При проектировании модулей для формирования управляемого напряжения обратного смещения фотодиода (0–500 В) и драйвера питания элемента Пельтье использовались импульсные преобразователи с формированием широтно-импульсной модуляции от встроенного микроконтроллера. Ключевое требование к фотоприемному устройству – способность работы в широком динамическом диапазоне интенсивностей, что достижимо только при максимальном подавлении различного рода наводок и шумов.

Основные помехи вносят импульсные высоковольтные DC/DC преобразователи, установленные в фотоприемном модуле. Всем без исключения DC/DC преобразователям присущи пульсации выходного напряжения [6], так как они содержат переключающие элементы, генерирующие электрические шумы и электромагнитные помехи. Даже примитивный DC/DC преобразователь, действующий на невысокой рабочей частоте преобразования энергии всего в несколько сотен кГц, может иметь шумовую характеристику в частотном диапазоне до 20 МГц и выше. Высокочастотные помехи присутствуют всюду, проникая с дорожек печатной платы и с входа на выход преобразователя через емкости связи внутри его компонентов. Кроме того, помеха вызывает пульсации напряжения на выходе и отраженные пульсации на входе. Это приводит к генерированию паразитных резонансов напряжения в любых установленных индуктивных элементах, таких как провода, дорожки печатной платы, переходные отверстия и контакты.

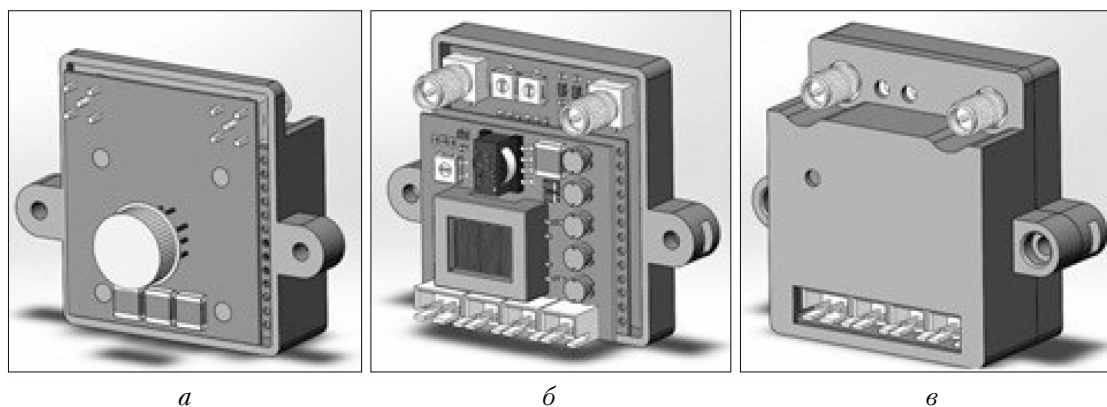


Рис. 2. Конструкция фотоприемника: *а* – модуль 2 со стороны фотодетектора; *б* – модуль 1, который включает источник низковольтного питания и блок микропроцессорного управления; *в* – фотоприемник в сборе

Существуют многочисленные рекомендации [7–10] по уменьшению наводок от DC/DC преобразователей за счет применения высокоэффективных фильтров, тщательного выбора электронных компонентов, качественной разводки и размещения элементов, что приводит к существенному удорожанию изделия. Таким образом, уровень помех от DC/DC преобразователей можно уменьшить до определенного предела, но устранить их полностью невозможно.

Способ уменьшения помех

При разработке фотоприемного модуля для использования в составе лидаров предложен иной способ уменьшения помех, генерируемых импульсными высоковольтными DC/DC преобразователями. Он заключается в том, что на время регистрации лидарного сигнала высоковольтный DC/DC преобразователь и драйвер элемента Пельтье выключаются. В общем случае максимальная информационная длительность лидарных сигналов не превышает 1 мс, а обратный ток ЛФД составляет не более 0,2 мА. За это время изменение высоковольтного напряжения обратного смещения на буферной емкости в 10 мкФ при отключенном DC/DC преобразователе составит < 20 мВ ($< 0,01\%$). Установленная температура фотодетектора имеет инерционный характер и даже при отключении драйвера элемента Пельтье практически не изменяется в течение 1 мс.

В фотоприемном устройстве предусмотрена возможность отключения источников импульсных помех на заданное оператором время. При поступле-

нии стробирующего сигнала на вход 2 модуля 1 (см. рис. 1), синхронизованного с частотой посылок лазерного излучения, микроконтроллер прекращает формировать широтно-импульсную модуляцию, управляющую источником высокого напряжения и драйвером питания Пельтье в модуле 2. По истечении заданного времени отключения микроконтроллер вновь начинает формировать ШИМ. Это позволяет значительно снизить наводимый шум в ходе регистрации информационного сигнала и уменьшить импульсные помехи на три порядка.

Для проверки предложенного способа уменьшения помех были проведены лабораторные стендовые испытания, в которых сигналы с ЛФД регистрировались на осциллографе фирмы LeCroy (модель Wave Surfer 42Xs). Полоса пропускания осциллографа – 400 МГц, что позволяет рассмотреть весь диапазон частотных помех, генерируемых электронными компонентами фотомодуля.

На рис. 3 приведена осциллограмма импульсного шума и помех при активированных и деактивированных DC/DC конверторах. При включенном конверторе размах импульсных пульсаций от пика к пику может достигать 4 В, а усреднение по 1000 выборкам дает стандартное отклонение в 20 мВ. При отключенном высоковольтном преобразователе импульсные пульсации отсутствуют, а средняя амплитуда собственных шумов фотодетектора при питании от буферных емкостей составляет не более 4 мВ. В этом случае усреднение по 1000 выборкам дает стандартное отклонение в 0,2 мВ. Таким образом, предложенный способ позволяет уменьшить средний уровень помех на два порядка, а амплитуду высокочастотных импульсов – на три.

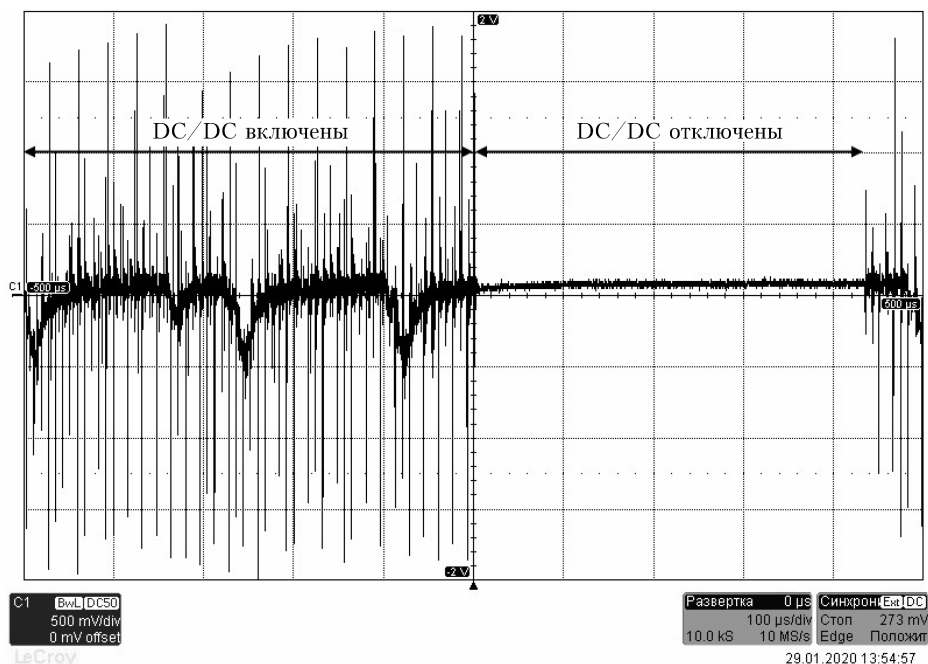


Рис. 3. Осциллограмма импульсного шума и помех при активированном (левая половина) и деактивированном (правая половина) DC/DC конверторе. Ось ординат – амплитуда 500 мВ на деление; ось абсцисс – развертка 100 мкс на деление

Такой способ уменьшения шума, генерируемого импульсными высоковольтными DC/DC преобразователями, был реализован в фотоприемном модуле, предназначенном для регистрации обратнорассеянного излучения лидара на $\lambda = 1,06$ мкм. В качестве фотодетектора использован ЛФД марки С30956ЕН-ТС фирмы Excelitas Technologies [11] с диаметром фоточувствительной зоны 3 мм и квантовой эффективностью 40% на этой длине волны. На рис. 4 показаны реализации сигналов при тестировании этого фотоприемника в многоволновой лидарной системе. В видимой области спектра лидарные сигналы регистрируются фотоумножителями ФЭУ Н11526-20-NF компании Hamamatsu.

Тестирование проводилось в лабораторных условиях без выхода лазерного излучения в атмосферу. Момент отключения DC/DC преобразователя синхронизируется с моментом поджига лампы накачки твердотельного лазера. Длительность выключенного

состояния задается программой управления регистрацией лидарных сигналов. Общее время отключения определяется длительностью задержки до начала импульса лазерного излучения и необходимым временем регистрации сигнала на измерительной трассе. В данном случае (рис. 4) оно составляло 200 мкс (140 мкс – задержка до импульса излучения и 60 мкс – время измерения сигнала на трассе). Видно, что после включения высоковольтного DC/DC преобразователя начиная с расстояния 8,5 км от лидара появляются интенсивные высокочастотные помехи.

Следующий этап тестирования заключался в испытаниях фотомодуля в составе лидара «ЛОЗА-А2» [12] при регистрации атмосферных эхосигналов. На рис. 5 представлены профили двух ортогональных поляризованных компонент лидарного сигнала в канале на $\lambda = 0,532$ мкм, а также сигнал с разработанного фотоприемника в канале на $\lambda = 1,064$ мкм.

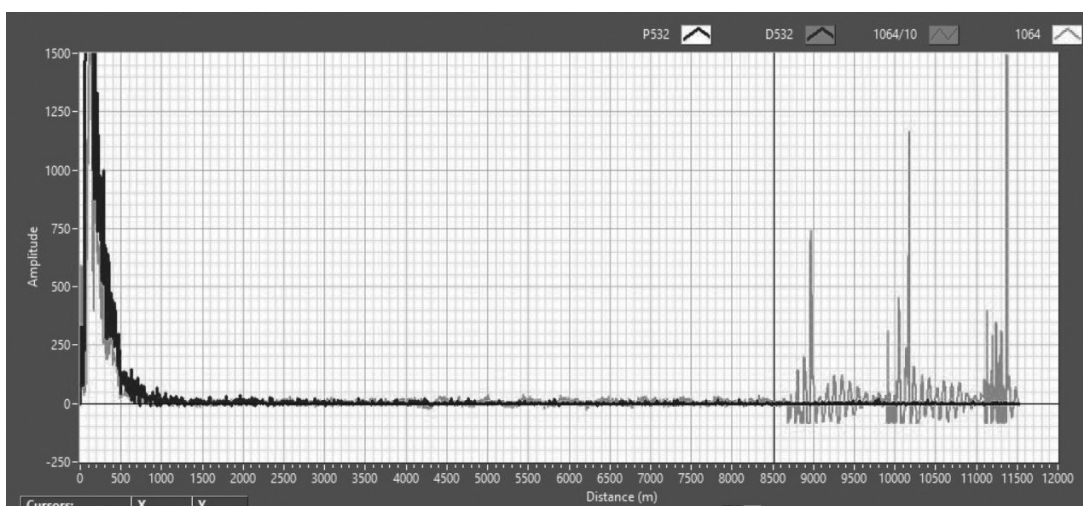


Рис. 4. Реализации сигналов тестирования фотоприемника в лидарной системе. Черный цвет – сигнал с ФЭУ для $\lambda = 0,532$ мкм, серый – сигнал с фотомодуля для $\lambda = 1,064$ мкм. По оси ординат отложена амплитуда, мВ; по оси абсцисс – дистанция, м

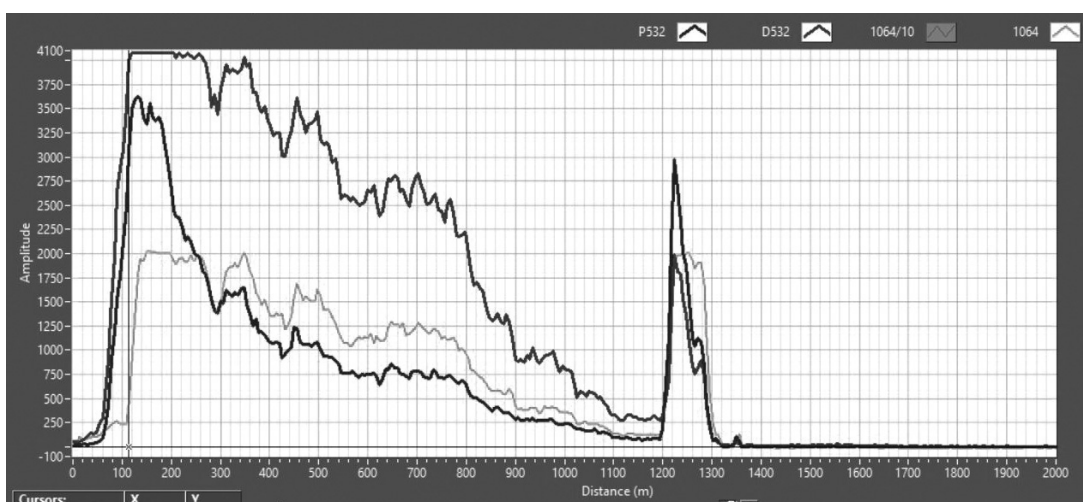


Рис. 5. Примеры лидарных эхосигналов зондирования пограничного слоя атмосферы. Черный цвет – сигналы с канала для $\lambda = 0,532$ мкм (верхний – кросс-поляризованный, нижний – ослабленный поляризованный), серый цвет – сигналы с канала на $\lambda = 1,064$ мкм

Как видно на рис. 5, эхосигналы с обоих каналов хорошо коррелируют между собой. Тонкая структура сигналов свидетельствует об отсутствии влияния собственных шумов фотомодуля при регистрации мелкомасштабных пространственных распределений аэрозольных образований в пограничном слое атмосферы. В процессе тестирования с помощью программно задаваемых регулировок высокого напряжения и температуры элемента Пельтье на ЛФД была выполнена оптимизация этих параметров для конкретного фотодетектора в конкретной лидарной системе.

Заключение

Описана концептуальная основа для создания фотоприемных модулей, используемых в лидарном комплексе. Представлены технические решения по уменьшению электромагнитных помех, генерируемых высоковольтными DC/DC преобразователями, путем кратковременного отключения последних и использования буферной емкости. Испытания фотоприемника, проведенные при его работе в лидарах Института оптики атмосферы СО РАН, показали эффективность разработанного модуля при регистрации сигналов в ближнем ИК-диапазоне в аналоговом режиме.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 05.616.21.0118, уникальный идентификатор RFMEFI61619X0118).

1. *Лидарный мониторинг облачных и аэрозольных полей, малых газовых составляющих и метеопараметров атмосферы* / под ред. Г.Г. Матвиенко. Томск: ИОА СО РАН, 2015. 449 с.
2. *Бобровников С.М., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Сериков И.Б., Суханов А.Я.* Лидарный спектроскопи-

- ческий газоанализ атмосферы. Томск: ИОА СО РАН, 2014. 508 с.
3. *Photomultiplier tube. Basics and Applications* [Electronic resource]. URL: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMTmodules_TPMO0011E.pdf (last access: 29.03.2018).
 4. URL: <https://www.first-sensor.com/products/optical-sensors/detectors/avalanche-photodiodes-apd/series-10-with-enhanced-nir-sensitivity-1064-nm/> (last access: 2.03.2018).
 5. *Слесарь А.С., Чайковский А.П., Иванов А.П., Денисов С.В., Король М.М., Осипенко Ф.П., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э.* Фотоприемные модули для лидарных станций в сети CIS-LiNet // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1073–1081.
 6. *Measurement and Filtering of Output Noise of DC-DC Converters* [Electronic resource]. URL: http://www.interpoint.com/resources/application_notes/ (last access: 27.02.2018).
 7. *Рентюк В.* Проблема оптимального выбора комбинации входных и выходных конденсаторов для подавления пульсаций и помех DC/DC-преобразователей. Часть 1 // Компоненты и технологии. 2016. № 11. С. 85–91.
 8. *Рентюк В.* Проблема оптимального выбора комбинации входных и выходных конденсаторов для подавления пульсаций и помех DC/DC-преобразователей. Часть 2 // Компоненты и технологии. 2016. № 12. С. 92–98.
 9. *Roberts S.* DC/DC Book of Knowledge. Practical tips for the User. Gmunden: RECOM, 2017. 234 p.
 10. *Робертс С.* Решения проблемы пульсаций и помех DC/DC-преобразователей: входная и выходная фильтрация // Компоненты и технологии. 2015. № 8. 74 с.
 11. URL: <https://www.excelitas.com/product-category/1064nm-long-wavelength-enhanced-si-apds/> (last access: 17.01.2018).
 12. *Balin Y.S., Kokhanenko G.P., Nadeev A.I., Novoselov M.M., Penner I.E., Rynkov O.A.* Experimental prototype of mobile (airborne) Lidar // Proc. SPIE. 2018. V. 10833-61. 7 p. DOI: 10.1117/12.2501862.

A.I. Nadeev, I.E. Penner, E.S. Shevtsov. Photodetector module for recording lidar signals in the near-infrared region.

A basic platform for photodetector modules used in the lidar complex for recording backscattered radiation in the near-infrared region is described. High-voltage pulse noise of DC/DC converters in the photodetector modules are reviewed and tested. A method is proposed for compensating the noise generated by such converters. The tests carried out in the lidars of Institute of Atmospheric Optics SB RAS showed the effectiveness of the module designed to record signals in analog mode at a wavelength of 1064 nm.