

Фотоприемные модули для лидарных станций в сети CIS-LiNet

А.С. Слесарь¹, А.П. Чайковский¹, А.П. Иванов¹, С.В. Денисов¹,
М.М. Король¹, Ф.П. Осипенко¹, Ю.С. Балин²,
Г.П. Коханенко², И.Э. Пеннер^{2*}

¹Институт физики НАН Беларуси
22007, г. Минск, пр. Независимости, 67, Беларусь
²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

Поступила в редакцию 7.06.2013 г.

В результате совместной работы научных групп Института физики НАН Беларуси и Института оптики атмосферы СО РАН создана линейка унифицированных фотоприемных модулей, обеспечивающих регистрацию лидарных сигналов в диапазоне 0,28–1,5 мкм в режимах аналогового сигнала и счета фотонов на основе ФЭУ и лавинных фотодиодов. Разработано программное обеспечение для управления фотоприемными модулями, и изготовлен испытательный стенд для измерения их характеристик. Изделия предназначены для использования на станциях лидарной сети CIS-LiNet.

Ключевые слова: лидар, фотодетектор, ФЭУ, счет фотонов; lidar, fotodetector, PMT, photon count.

Введение

Наряду с космическими лидарными наблюдениями, координированные измерения на станциях международных лидарных сетей формируют основной объем данных о высотных изменениях характеристик аэрозольных полей и крупномасштабном переносе аэрозоля в атмосфере.

На Евразийском континенте сформированы региональные лидарные сети: European Aerosol Research Lidar Network (EARLINET) [1], Asian Dust Network (AD-Net) [2], лидарная сеть на пространстве стран СНГ CIS-LiNet [3, 4]. Созданная под эгидой Всемирной метеорологической организации лидарная сеть GALION [5] призвана координировать наблюдения региональных лидарных сетей в глобальном масштабе.

Обеспечение однородности и качества измеряемых данных является ключевой задачей при проведении сетевых измерений, решение которой требует унификации измерительной аппаратуры и алгоритмов обработки данных. В настоящей работе приведены результаты разработки унифицированных фотоприемных модулей для регистрации лидарных

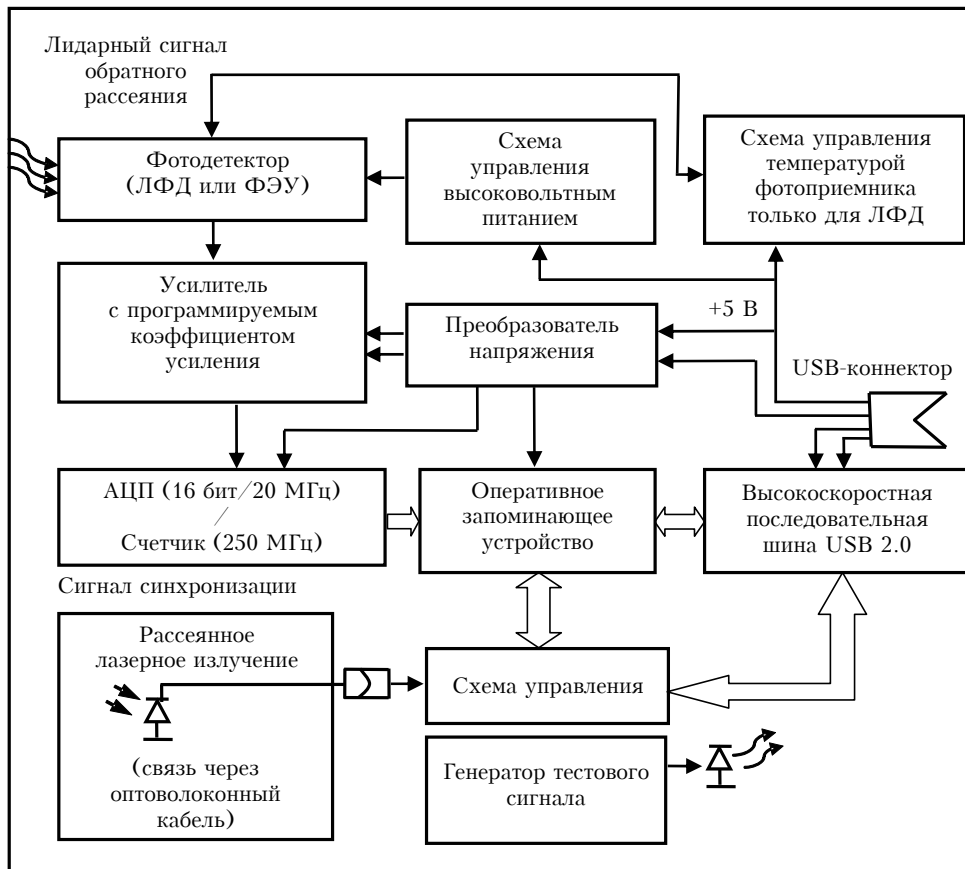
сигналов в режиме аналогового сигнала и счета фотонов в спектральном диапазоне 0,28–1,5 мкм на основе ФЭУ и лавинных фотодиодов, способы их калибровки и оценки погрешности измерений лидарных сигналов.

Разработки проведены совместно научными группами Института физики НАН Беларуси и Института оптики атмосферы СО РАН с целью совершенствования аппаратуры в сети CIS-LiNet.

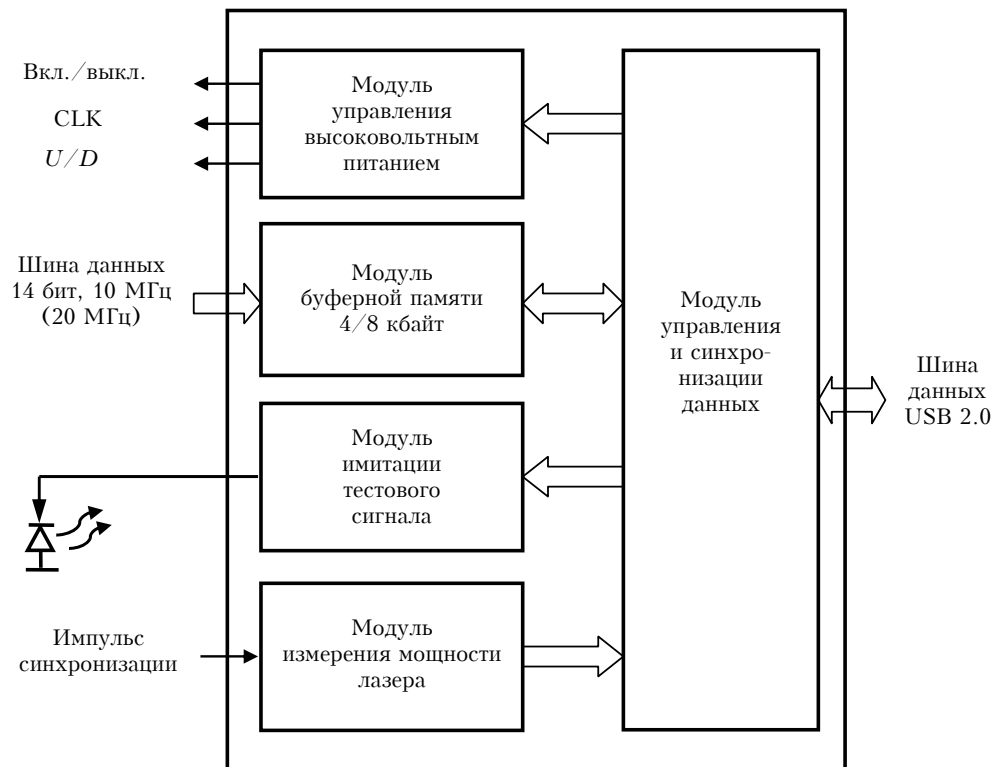
1. Интегрированный фотоприемный блок для регистрации оптического сигнала в лидарных системах

В ИФ НАНБ разработан интегрированный фотоприемный блок на унифицированных модулях, обеспечивающий регистрацию оптического лидарного сигнала, его оцифровку и передачу данных в компьютер. Основным требованием к аналоговой части фотоприемного устройства является способность работы в широком динамическом диапазоне интенсивности локационного сигнала, при максимальном подавлении различного рода наводок и шумов, прежде всего от источников питания лазера. Это особенно важно при регистрации слабых оптических сигналов с удаленных участков трассы зондирования. Итогом разработок стала линейка моделей фотоприемных блоков для регистрации излучения в спектральном диапазоне 0,28–1,5 мкм в режиме аналогового сигнала и счета фотонов.

* Александр Сергеевич Слесарь; Анатолий Павлович Чайковский (chaikov@dragon.bas-net.by); Аркадий Петрович Иванов; Сергей Вадимович Денисов; Михаил Михайлович Король; Федор Петрович Осипенко; Юрий Степанович Балин (balin@iao.ru); Григорий Павлович Коханенко; Иоганес Эрнстович Пеннер (penner@iao.ru).



a



b

Рис. 1. Структурные схемы интегрированного фотоприемного блока (а) и его цифровой части (б)

Основная идея разработки состояла в том, чтобы создать функционально законченный фотоприемный блок, в котором содержатся все устройства, необходимые для регистрации и оцифровки лидарного сигнала. Предполагалось исключить все длинные аналоговые линии связи между приемными и регистрирующими узлами приемной системы лидара, которые и являются основными «приемниками» помех. В результате возрастет надежность всей системы и уменьшится ее стоимость.

В состав модуля (рис. 1, а) входят:

- фотодетектор (фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) или лавинный фотодиод (ЛФД) с платой предварительного усилителя);
- схема управления и источник высоковольтного питания фотоприемника;
- источник питания элементов «Пельтье» для поддержания заданной температуры рабочей области фотоприемника (только для ЛФД);
- усилитель с программируемым коэффициентом усиления;
- аналогоцифровой преобразователь или счетчик одноэлектронных импульсов (задается в программном коде программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) «ALTERA»);
- запоминающее устройство типа FIFO (первый вошел, первый вышел);
- конвертор напряжения для низковольтных цепей питания (входное напряжение +5 В);
- схема управления (представляет собой программный код, загружаемый в ПЛИС «ALTERA» при каждом включении);
- генератор тестового сигнала (два последовательных оптических сигнала от одного источника с соотношением амплитуд примерно 6:1);
- интерфейс высокоскоростной универсальной последовательной шины USB 2.0.

В УФ- и видимой областях спектра в качестве фотодетекторов, в зависимости от назначения, используются различные типы аналоговых и счетных ФЭУ, в основном производства Hamamatsu, а также образцы моделей ФЭУ-84, характеризующихся большим током анода и обеспечивающих работоспособность приемного канала при высоких фоновых засветках и интенсивных локационных сигналах

из ближней зоны, ФЭУ-175 – счетные фотоприемники с высоким коэффициентом умножения. В ИК-диапазоне для регистрации излучения на длине волны 1,06 мкм применяются ЛФД-модули типа С30956ЕН-ТС с охлаждением на элементе Пельтье, на длине волны 1,5 мкм – ЛФД-модули типа С30659-1550-R2АН.

С целью уменьшения габаритов лидарной системы фотоприемные модули имеют функционально законченную конструкцию, в которой фотоприемники, усилители сигналов, измерительные и интерфейсные схемы, а также блоки высоковольтного питания размещены в одном корпусе.

Аналоговая часть фотоприемного модуля (усилители и аналогоцифровой преобразователь) выполнены на микросхемах фирмы «Analog Device» (США). Цифровая часть электрической схемы фотоприемных модулей реализована на основе (ПЛИС) CYCLON фирмы ALTERA.

Цифровые ПЛИС высокой степени интеграции имеют программируемую пользователем внутреннюю структуру и предназначены для реализации сложных цифровых устройств. Использование ПЛИС и соответствующих средств автоматизации проектирования позволяет в сжатые сроки создавать конкурентоспособные устройства и системы, удовлетворяющие требованиям по производительности, энергопотреблению, надежности, габаритным размерам и стоимости.

Для реализации цифровой части электрической схемы фотоприемного модуля применена микросхема EP1C3F144C8 семейства программируемой логики CYCLON. Связь с компьютером обеспечивается с помощью отдельной интерфейсной микросхемы CY7C68001LFC фирмы CYPRESS. Структурная схема цифровой части фотоприемного модуля представлена на рис. 1, б.

На рис. 2 приведен внешний вид интегрированного фотоприемного модуля PRM-01/С30956ЕН-ТС. Используется следующая маркировка: PRM – Photo Receiving Module, цифры 01 означают аналоговый, 02 – счетный режим регистрации. Заключительная комбинация букв и цифр идентифицирует фотоприемник, используемый в устройстве. Технические характеристики фотоприемных блоков приведены в таблице.



Рис. 2. Интегрированный фотоприемный блок

Характеристики интегрированных фотоприемных блоков

Параметр	Тип устройства			
	PRM-01/ FEU-84 Hamamatsu R6427	PRM-01/ C30956EH-TC	PRM-02/ Hamamatsu H7360-02 H7360-03	PRM-02/ FEU-175
Спектральный диапазон регистрируемого излучения, нм	300–800	450–1100	300–550 300–850	300–800
Температура рабочей поверхности фотоприемника	окружающей среды	–10 °С	окружающей среды	окружающей среды
Разрядность АЦП (счетчика одноэлектронных импульсов)	14/16	14/16	8	8
Частота выборок АЦП, МГц	10/20	10/20	–	–
Максимальная частота счета одноэлектронных импульсов, МГц	–	–	250	250
Объем буферной памяти, кбайт	4/8	4/8	4/8	4/8
Частота обработки реализаций входного сигнала, кГц	1	1	1	1
Напряжение питания фотоприемника, В	–500 ÷ –1500 (программно регулируемое)	+250 ÷ +350 (согласно ТУ)	+5	–500 ÷ –1800 (программно регулируемое)
Амплитуда пульсаций напряжения питания фотоприемника, %, не более	0,01	0,01	1	0,01
Интерфейс обмена данными с ПК	Универсальная последовательная шина USB 2.0			
Максимальная длина линии связи с ПК, без дополнительных концентраторов, м	5			
Размеры, мм	110×80×70			
Масса, г	600			
Максимальное потребление от внешнего источника питания +5 В, А	0,5	1,0	0,5	0,5

Как правило, в лидарной системе используют несколько фотоприемных блоков. Шины выходных данных устройств объединяются в один канал через USB-концентратор. Если число используемых блоков невелико, их внешнее питание обеспечивается через USB-линию, которая в этом случае является единственной внешней электрической линией связи для фотоприемного модуля. В противном случае, когда число используемых фотоприемных блоков велико, подключается дополнительный внешний низковольтный источник питания.

2. Источник питания ФЭУ на основе умножителя напряжения

Лазерные локаторы (лидары), предназначенные для работы в дневное время, принимают импульсные световые сигналы в аналоговом режиме в условиях повышенных фоновых засветок. В особенности это относится к сканирующим лидарам, в которых уровень фона в сеансе зондирования в зависимости от сектора сканирования может изменяться в несколько раз. Для таких лидаров разработан источник питания ФЭУ, устраняющий зависимость коэффициента усиления фотоумножителя от фонового анодного тока.

Типовое устройство питания фотоэлектронных умножителей, как правило, состоит из высоковольтного блока питания и резистивного делителя. Стандартные резистивные делители напряжения, исполь-

зуемые при съеме сигналов с ФЭУ, требуют источников высокого напряжения со значительным постоянным током нагрузки. Обычно считается, что ток нагрузки должен по крайней мере в 10 раз превосходить средний анодный ток ФЭУ. В противном случае, из-за перераспределения потенциалов на диодах, возникают значительные искажения сигналов.

Преимущество используемых в практике лидарного зондирования ФЭУ-84 заключается в большом допустимом значении среднего анодного тока — до 5 мА. Подобные токи могут возникнуть при работе днем в условиях сильных фоновых засветок. Однако в реальных конструкциях резистивных делителей потребляемые токи не превосходят 2–3 мА, что объясняется ограничениями на рассеиваемую мощность, а также отсутствием стандартных высоковольтных источников питания с большими токами. В результате этого преимущества ФЭУ-84 остаются неиспользуемыми.

В ИОА СО РАН предложен и реализован принципиально новый подход к схеме питания ФЭУ (рис. 3). Источник питания состоит из двухтактного преобразователя с независимым возбуждением, работающим на частоте 150 кГц. Величина напряжения, равная междинодному потенциалу (100–120 В), устанавливается изменением напряжения питания преобразователя. Выходное напряжение с преобразователя подается на двухполупериодный многокаскадный умножитель напряжения. Постоянная засветка при этой схеме питания не изменяет междинодных

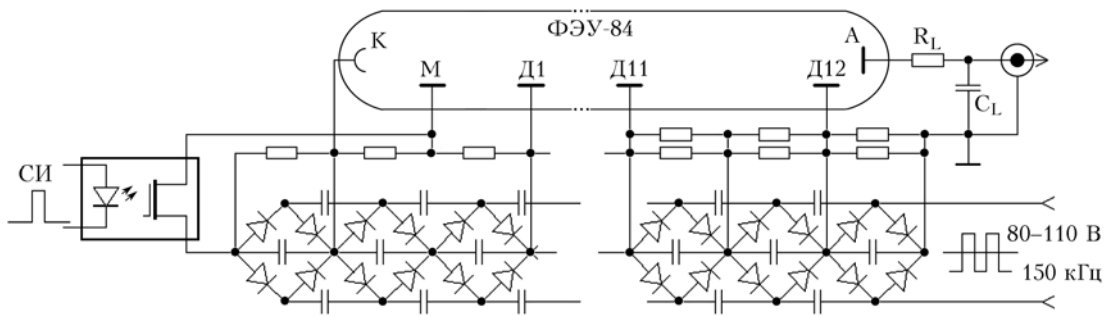


Рис. 3. Принципиальная схема разработанного модуля питания ФЭУ-84

напряжений, что определяет постоянство коэффициента умножения ФЭУ. Выходные диоды (Д10–Д12–А (анод)) ФЭУ-84 запитываются по схеме 1:2:1 для увеличения диапазона линейности. (Как правило, диапазон линейности для ФЭУ-84 составляет 1–1,5 В на нагрузке 50 Ом.) Выход ФЭУ согласован с 50-Ом кабелем, цепочка $R_L C_L$ установлена для подавления высокочастотных шумов, что несколько ухудшает временное разрешение ФЭУ (≈ 120 нс).

Входной каскад постоянно заперт путем подачи инверсного напряжения на модулятор М относительно фотокатода К. Это предохраняет ФЭУ от избыточного анодного тока в промежутках между лидарными сигналами. При приходе синхросигнала СИ (от поджига лампы накачки) отгореле отключает запирающее напряжение от модулятора, и к моменту лазерного импульса на модуляторе устанавливается рабочее напряжение. Время открытия затвора устанавливается резистором на плате и составляет примерно 60 км дальности зондирования. Затвор может быть отключен, и тогда ФЭУ постоянно включено при подаче напряжения питания. Однако в этом случае существует опасность повреждения ФЭУ, поскольку в отличие от резистивного делителя величина анодного тока не падает при больших фоновых засветках.

Потребление тока в момент включения (при зарядке емкостей) не превышает 50 мА. В дальнейшем, при отсутствии засветки ФЭУ, потребление тока полностью отсутствует, что позволяет отказаться от теплоотвода и уменьшить габариты источника питания. Ниже приведено сравнение характеристик используемых фотомодулей и приемников с резистивным делителем.

На рис. 4 показано изменение амплитуды сигнала при различных значениях среднего анодного тока ФЭУ (I_{Φ}). Амплитуда сигнала равна 600 мВ для всех фотоприемников в отсутствие фоновой засветки. При небольших засветках (0,5 мА) для всех ФЭУ заметно некоторое увеличение сигнала, затем величина сигнала для резистивного делителя резко падает, и измерения при таких засветках становятся невозможными. Для разработанного модуля падения сигнала не наблюдается. Испытания показали, что до засветок, соответствующих среднему анодному току 10 мА, коэффициент усиления ФЭУ неизменен.

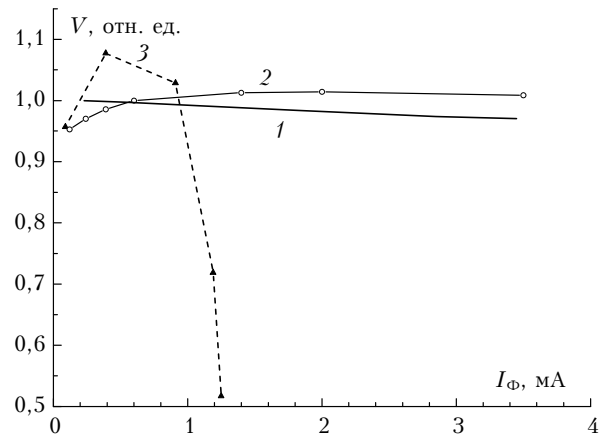


Рис. 4. Амплитуда сигнала при различных значениях среднего анодного тока ФЭУ: кривая 1 соответствует модулю ЛФД; 2 – модулю ФЭУ-84 со схемой питания на умножителях напряжения; 3 – стандартный резистивный делитель ФЭУ при токе делителя 2 мА

Примененный принцип распределения питания диодов приводит к улучшению линейности световой характеристики фотоприемника. На рис. 5 показаны световые характеристики для модуля ЛФД, модуля ФЭУ и стандартного резистивного делителя при различных фоновых токах. Разработанная схема питания ФЭУ используется в настоящее время в лидарах серии ЛОЗА [6].

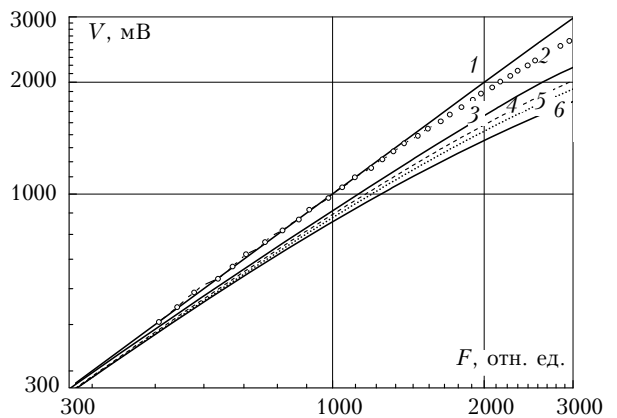


Рис. 5. Световая характеристика фотоприемников: 1 – модуль ЛФД; 2 – разработанный модуль ФЭУ-84; 3–6 – ФЭУ с резистивным делителем при значениях среднего анодного тока 0, 0,25, 0,4 и 0,6 мА соответственно

Для оценки качества фотоприемных модулей, разработанных в ИФ НАНБ и ИОА, была проведена серия специальных интеркалибровочных экспериментов на лидарных системах в Минске и Томске. Основными задачами экспериментов являлись оценка влияния высоких фоновых засветок на работу фотоприемных модулей и выбор оптимальной схемы питания фотоумножителей для режима высоких фоновых засветок.

Зондирование атмосферы осуществлялось в дневное время на длине волны 532 нм. Были проведены сопоставления лидарных сигналов при зондировании в направлении солнечного ореола и вдали от направления на Солнце. При этом значение среднего анодного тока уменьшалось в 40 раз (от 1 до 0,05 мА). Абсолютные значения сигналов и сигналы за вычетом фона для двух модулей приведены на рис. 6.

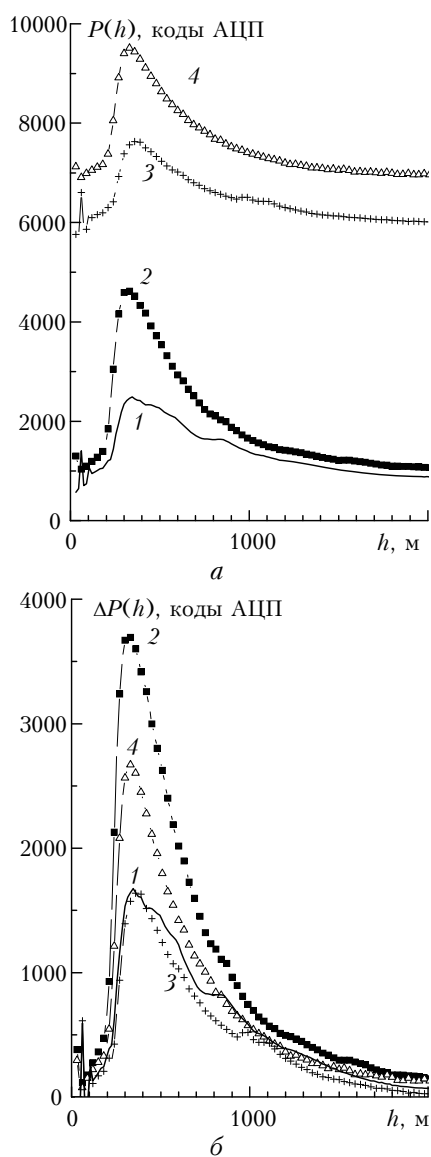


Рис. 6. Сигналы с ФЭУ при различных фоновых засветках: а – абсолютные значения сигналов; б – сигналы за вычетом фоновой засветки; 1, 3 – модуль с умножителем напряжения; 2, 4 – модуль с резистивным делителем

Из представленных графиков следует, что при наблюдении в сторону Солнца сигнал, регистрируемый с использованием резисторного делителя напряжения (кривая 4), занижен на 30% по отношению к сигналу при отсутствии фоновой засветки (кривая 2). Вызвано это известным для резистивного делителя напряжения эффектом изменения потенциала на динодах ФЭУ при увеличении среднего анодного тока. В то же время применение схемы питания с отдельными источниками позволяет избежать падения чувствительности ФЭУ при существенных фоновых засветках. Натурные измерения и более детальные исследования на стенде показали, что при такой схеме включения ФЭУ его линейность сохраняется при значениях среднего анодного тока, сравнимых с предельно допустимым.

В результате сравнений приемных модулей, проведенных совместно на лидарных станциях ИФ и ИОА, в дальнейшем были внесены изменения в схему питания ФЭУ в разработанных модулях.

3. Тестирование линейности фотоприемных блоков

Основным требованием к фотоприемному каналу лидара является линейное отображение интенсивности локационного сигнала цифровым массивом, формируемым в приемном канале. Большой динамический диапазон локационного сигнала, возможные скачки интенсивности сигнала на границах аэрозольных слоев и высокий уровень фоновых засветок при зондировании в дневное время делают эту задачу технически сложной. Динамический диапазон приемного канала может ограничиваться как характеристиками используемого фотоприемника, так и электронными устройствами преобразования и оцифровки сигнала, поэтому требуется проводить аттестацию линейности всего приемного тракта от фотоприемника до цифрового выхода.

С целью тестирования и выбора оптимальных настроек фотоприемных модулей был разработан испытательный стенд. Схема стенда, объясняющая процедуру измерения линейности фотоприемного блока, приведена на рис. 7.

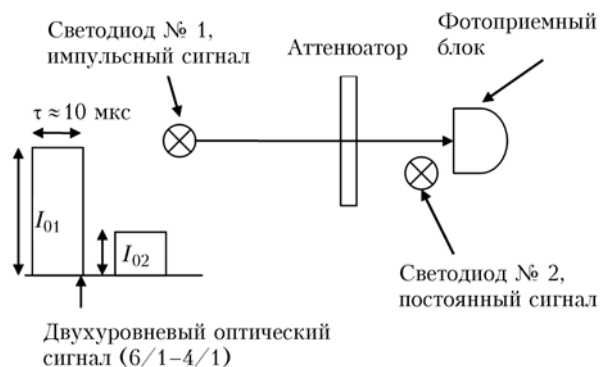


Рис. 7. Схема стенда для тестирования линейности фотоприемного блока

С определенными изменениями эта схема используется в практике оптических измерений, например в [7]. Схема проста в реализации и не требует прецизионных оптических и измерительных электронных устройств. Импульсным генератором, в качестве которого может использоваться встроенный генератор другого фотоприемного блока, и светодиодом № 1 формируется двойной оптический сигнал с соотношением уровней порядка 6/1–4/1. Светодиод № 2 создает постоянную засветку фотоприемника, соответствующую уровню фонового сигнала при работе лидара. Интенсивности оптических сигналов светодиодов № 1 и 2 не изменяются в процессе измерений.

Фотоприемный блок измеряет амплитуды I_1 и I_2 оптического сигнала при увеличении засветки светодиодом № 1 за счет его приближения и смены аттенюатора. Выше некоторого уровня засветки отношение $k(\hat{I}_1) = \frac{I_1}{I_2}$ (\hat{I}_1 – пересчитанная на выходной сигнал максимальная интенсивность входного оптического сигнала) уменьшается, что отражает проявившуюся нелинейность фотоприемного канала.

Нелинейность канала оценивается выражением

$$d(\hat{I}_1) = \frac{k - k_0}{k_0}, \quad (1)$$

где $k_0 = \frac{I_{01}}{I_{02}}$ – отношение амплитуд при малом уровне засветки приемника излучением светодиода № 1.

Оценкой величины \hat{I}_1 при небольших величинах нелинейности может быть величина

$$\hat{I}_1 = k_0 I_2. \quad (2)$$

Описанная процедура применяется для измерения нелинейности всех типов фотоприемных блоков: аналоговых и счетных, выполненных на основе ФЭУ и ЛФД. На рис. 8 приведены измеренные распределения нелинейности (1) в зависимости от интенсивности входного оптического сигнала, который оценивается величиной \hat{I}_1 (2) по измеренной I_2 на выходе фотоприемного блока. Приведены результаты тестирования аналоговых модулей на основе ФЭУ-84 и ЛФД С30956ЕН-ТС и счетного модуля на основе ФЭУ-175. Единичей измерения интенсивности излучения для аналоговых модулей является шаг квантования 14-разрядного АЦП, для счетного модуля – откорректированная на «мертвое» время ФЭУ частота одноэлектронных импульсов.

Отклонения от линейности всех фотоприемных блоков в рабочем диапазоне входного сигнала находятся в интервале $\pm 0,02$ и имеют вид случайной величины.

Максимальным сигналом на выходе 14-разрядного АЦП является величина 16384. За вычетом фонового сигнала амплитудой 2230 и небольшого

положительного смещения нулевой линии (150 единиц) максимальная амплитуда измеряемого сигнала составляла 14000. Проявления нелинейности аналоговых блоков регистрации при значении сигналов выше 13000 в нашем случае обусловлены именно характеристиками АЦП и адаптированных для него электронных узлов. Для смещения рабочего диапазона в область больших сигналов требуется уменьшить коэффициент усиления аналогового сигнала.

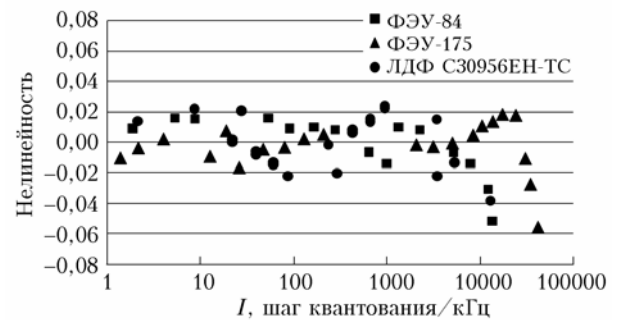


Рис. 8. Нелинейность фотоприемных блоков в зависимости от интенсивности входного оптического сигнала

Основной причиной нелинейности счетного фотоприемного блока является «мертвое» время ФЭУ, величина нелинейности зависит от соотношения длительности одноэлектронного импульса и интенсивности потока счетных импульсов.

4. Оценка ошибки измерения лидарного сигнала

Для расчетов характеристик атмосферы по данным лидарного зондирования входной информацией является локационный сигнал I_n^* зондирующего излучения от атмосферы, а также оценка погрешности его измерения. В настоящем разделе предлагаются алгоритм расчета ошибки лидарных измерений и процедура оценки требуемых для этих расчетов параметров фотоприемных блоков.

Полный сигнал \hat{I}_n в лидарном эксперименте представляет сумму лидарного сигнала I_n и фона I_B . Оценку лидарного сигнала I_n^* в лидарном эксперименте мы получаем как результат двух независимых измерений полного сигнала \hat{I}_n^* и фона I_B^* :

$$I_n^* = \hat{I}_n^* - I_B^*. \quad (3)$$

Здесь «звездочка» указывает, что данная величина получена в результате измерений и является оценкой соответствующего лидарного сигнала.

Величины \hat{I}_n^* и I_B^* являются статистически независимыми, поэтому будет справедливо следующее соотношение для дисперсий компонентов лидарного сигнала:

$$\delta^2(I_n^*) = \delta^2(\hat{I}_n^*) + \delta^2(I_B^*) = \delta^2(I_n) + 2\delta^2(I_B), \quad (4)$$

где $\delta^2(I_n)$ – дисперсия, обусловленная локационным сигналом при отсутствии фона, $\delta^2(I_B)$ – дисперсия фонового сигнала.

Вне зависимости от типа фотоприемного модуля и режима измерений выделяются три основные компоненты дисперсии $\delta^2(I_n^*)$:

– нелинейность канала регистрации, которая определяется нелинейностью фотоприемника, а также электронных блоков канала регистрации;

– шумовая компонента, «несинхронная» по отношению к моменту посылки зондирующего импульса;

– шумовая компонента, «синхронная» по отношению к моменту посылки зондирующего импульса.

Оценка нелинейности фотоприемных модулей производится на испытательном стенде по процедуре, описанной в разд. 3. Из рассмотрения данных экспериментальных измерений, выполненных для различного типа фотоприемных модулей, примеры которых приведены на рис. 8, относительная дисперсия нелинейных искажений локационного сигнала в рабочем диапазоне фотоприемных модулей может характеризоваться верхней оценкой

$$\frac{\delta^2(I_{n,nonl}^*)}{(I_{n,nonl}^*)^2} = \omega^2. \quad (5)$$

Нелинейность фотоприемных модулей, результаты тестирования которых приведены на рис. 8, составляет величину $\omega \approx 0,02$.

Источником несинхронного шума в аналоговом приемном канале лидарной системы являются, в первую очередь, дробовой эффект, а также погрешность оцифровки сигнала аналогоцифровым преобразователем и электрические помехи. Приближенную оценку дисперсии несинхронного шума можно представить выражением

$$\delta^2(I_{nonsin}^*) = g^2 + \Delta f q^2 (I_n^* + 2I_B^*), \quad (6)$$

где g^2 – суммарный вклад электрических помех, погрешности оцифровки и других источников, независящий от амплитуды принимаемого сигнала; q^2 – коэффициент, характеризующий мощность дробового шума; Δf – частотная полоса пропускания канала регистрации.

В счетных регистрирующих каналах дробовой шум проявляется через флуктуации числа накопленных одноэлектронных импульсов во временном стробе счетчика фотоприемного модуля. Вероятность регистрации фотонов описывается пуассоновским распределением, и относительная дисперсия числа зарегистрированных фотонов уменьшается пропорционально их числу. Внешние помехи могут вносить вклад в регистрируемый сигнал, если их амплитуда больше порога дискриминации счетчиков одноэлектронных импульсов.

Синхронный шум в аналоговых каналах регистрации вызван, в первую очередь, воздействием электрических импульсов в блоках питания лазеров, синхронных с посылкой зондирующего импульса. Синхронный шум преимущественно является низкочастотным, и ограничение полосы частот приемного канала не приводит к его снижению. Накопление сигнала, уменьшающее относительную дисперсию несинхронного шума, в данном случае

также неэффективно. В счетных каналах регистрации синхронная электрическая помеха может генерировать ложные импульсы, воспринимаемые счетчиками фотоприемных блоков.

Суммируя вклады основных компонентов шума, запишем следующие выражения для оценки дисперсии локационных сигналов (I_n^* и N_n^*) при их измерениях в аналоговом и счетном режимах соответственно:

$$\frac{\delta^2(I_n^*)}{I_n^{*2}} = \omega^2 + \frac{g^2 + q^2(I_n^* + 2I_B^*)}{A(2M+1)I_n^{*2}} + \frac{u^2}{I_n^{*2}} \quad (7)$$

и

$$\frac{\delta^2(N_n^*)}{N_n^{*2}} = \omega^2 + \frac{N_g^2 + (N_n^* + 2N_B^*)}{A(2M+1)N_n^{*2}} + \frac{N_u^2}{N_n^{*2}}, \quad (8)$$

где N_B^* , N_u и N_g – число фоновых, «ложных» синхронных и «ложных» несинхронных одноэлектронных импульсов соответственно.

Предполагается, что при регистрации сигналов проводится их усреднение по $2M+1$ стробам и накопление данных измерений при количестве зондирующих импульсов, равном A .

Для пользования оценками (7) и (8) должны быть определены следующие технические характеристики фотоприемных модулей: ω – нелинейность, g – амплитуда несинхронного шума (число «ложных» несинхронных одноэлектронных импульсов N_g), q – коэффициент дробового шума, u – амплитуда синхронного шума (число «ложных» синхронных одноэлектронных импульсов N_u).

Процедура и оценка нелинейности ω описаны в разд. 3. Несинхронный шум, создаваемый в электронных узлах интегрированных аналоговых и счетных фотоприемных модулей, мал, параметры g , N_g можно считать равными нулю.

Для оценки коэффициента дробового шума q для каждого фотоприемного модуля проводится серия специальных измерений на испытательном стенде. В отсутствие других источников помех флуктуации регистрируемого сигнала создаются дробовым шумом и их амплитуда зависит от условий измерений в соответствии с выражением

$$\delta(I_n^*) = q \sqrt{\frac{(I_n^* + 2I_B^*)}{A(2M+1)}}. \quad (9)$$

Калибровочные измерения проводятся при различных интенсивностях полезного и фонового сигналов, серии значений накопления сигналов и числа стробов усреднения. По записям сигнала на плоских участках локационного сигнала рассчитывается его среднее квадратическое отклонение $\delta(I_n^*)$. Затем строится график зависимости $\delta(I_n^*) = f(Q)$,

где $Q = \sqrt{\frac{(I_n^* + 2I_B^*)}{A(2M+1)}}$ (рис. 9). Наклон прямой, аппроксимирующей точки экспериментальных измерений, считается оценкой параметра q для данного фотоприемного модуля.

Амплитуда синхронного шума u в аналоговых модулях (N_u – в счетных модулях) проверяется при их работе в лидарных установках. Производится длинная серия измерений с накоплением сигналов. При этом приемный объектив остается закрытым. Оставшиеся низкочастотные изменения сигнала вызываются синхронными помехами, преимущественно системой питания излучателя. В исправных и правильно установленных аналоговых фотоприемных модулях отклонения сигнала от нулевого значения в рабочем диапазоне расстояний должны быть не более 0,01–0,02.

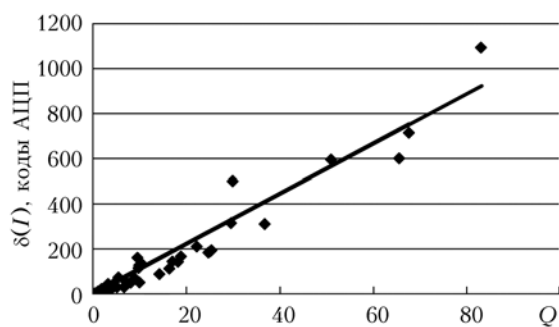


Рис. 9. Зависимость интенсивности флуктуаций сигнала от параметра Q

В исправных счетных модулях N_u мал и трудно определяется из-за темнового тока ФЭУ. Однако синхронный сигнал N_u может возникать как результат «последствия» от интенсивной засветки сигналом в ближней зоне. Обнаружить этот эффект можно в более сложном эксперименте, когда высокоскоростной обтюратор перекрывает дальнюю зону принимаемого сигнала, так что сигнал последствия может регистрироваться.

Заключение

В статье описаны унифицированные фотоприемные модули, используемые в лидарных комплексах сети CIS-LiNet. Проведенные испытания на

многоволновых лидарах Института физики НАН Беларуси и Института оптики атмосферы СО РАН показали эффективность разработанных модулей, предназначенных для регистрации сигналов в аналоговом и счетно-фотонном режимах.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта НАНБ (БРФФИ) – СО РАН Ф12СО-028, проекта № 31 СО РАН, грантов РФФИ № 13-05-00096, 13-08-98013р.

1. Bösenberg J., Ansmann A., Baldasano J.M., Balis D., Böckmann Ch., Calpini B., Chaikovsky A., Flamant P., Hågård A., Mitev V., Papayannis A., Pelon J., Resendes D., Schneider J., Spinelli N., Trickl T., Vaughan G., Visconti G., Wiegner M. EARLINET-A European Aerosol Research Lidar Network // Advances in Laser Remote sensing: Selected papers 20th Int. Laser Radar Conference (ILRC). Vichi, France, 10–14 July 2000. P. 155–158.
2. Murayama T., Sugimoto N., Matsui I., Liu Z., Sakai T., Shibata T., Iwasaka Y., Won J.G., Yoon S.C., Li T., Zhou J., Hu H. Lidar Network Observation of Asian Dust // Advances in Laser Remote sensing: Selected papers 20th Int. Laser Radar Conference (ILRC). Vichi, France, 10–14 July 2000. P. 169–177.
3. Чайковский А.П., Иванов А.П., Балин Ю.С., Ельников А.В., Тулинов Г.Ф., Плюшин И.И., Букин О.А., Чен Б.Б. Лидарная сеть CIS-LiNet для мониторинга аэрозоля и озона: методология и аппаратура // Оптика атмосф. и океана. 2005. V. 18, № 12. С. 1066–1072.
4. Бураков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Лидарные наблюдения аэрозольных возмущений стратосферы над Томском (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.) в период вулканической активности 2006–2010 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1031–1040.
5. Bösenberg J., Hoff R. Plan for the implementation of the GAW Aerosol Lidar Observation Network GALION // GAW report N 178. 2007. 46 p.
6. Балин Ю.С., Байрашин Г.С., Коханенко Г.П., Клемашева М.Г., Пеннер И.Э., Самойлова С.В. Аэрозольно-рамановский лидар «ЛОЗА-М2» // Квант. электрон. 2011. Т. 41, № 10. С. 945–949.
7. Photomultiplier tube. Basics and Applications: Third editions. [Electronic resource]. – URL: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf

A.S. Slesar, A.P. Chaikovsky, A.P. Ivanov, S.V. Denisov, M.M. Korol, F.P. Osipenko, Yu.S. Balin, G.P. Kokhanenko, I.E. Penner. **Fotodetector modules for CIS-LiNet lidar network stations.**

Range of standardized fotodetector modules are created due to cooperation of scientific groups of Institute of Physics, NASB, Belarus, and Institute of Atmospheric Optics, SB RAS, Russia. These modules provide the signal registration in wavelength range from 0.28 to 1.5 μm by the use of PMT or avalanche photodiodes under analog or photon count regimes. The software for modules control is developed and a test stand for measuring of their parameters is made. The modules are suitable for the use at CIS-LiNet lidar network stations.