

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 551.501

Д.И. Шелефонтюк

СИСТЕМЫ СЧЕТА ФОТОНОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Рассматриваются основные проблемы, возникающие при проектировании фоторегистрирующей аппаратуры для лидарных исследований. Обсуждаются результаты, полученные автором при экспериментальных исследованиях характеристик фотоэлектронных умножителей, работающих в режиме счета фотонов, даны рекомендации по использованию фотоумножителей в лидарных системах различного назначения. Рассматриваются вопросы проектирования амплитудных дискриминаторов и счетчиков одноэлектронных импульсов, приводятся технические характеристики разработанных автором систем счета фотонов.

При решении ряда задач лазерного зондирования атмосферы регистрация лидарных сигналов ведется в режиме счета фотонов. Основными факторами, ограничивающими точность измерения параметров атмосферы в этом режиме, являются низкая интенсивность лидарных сигналов, их большой динамический диапазон, наличие внешних и внутренних шумов, дрейф параметров аппаратуры во время измерений. Учет перечисленных факторов при разработке фоторегистрирующей аппаратуры позволяет при современных технических характеристиках лидарных систем обеспечить погрешность измерений в несколько долей процента.

Известно, что для аппаратной реализации метода счета фотонов используется последовательное соединение фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), амплитудного дискриминатора одноэлектронных импульсов (ОИ) и счетчика ОИ [1]. Кроме того, необходимым элементом современной лидарной системы является ЭВМ, обеспечивающая согласованную работу блоков системы, сбор данных и обработку полученных результатов по заданным алгоритмам. Разработка системы счета фотонов для лидарного комплекса включает три этапа:

- правильный выбор типа ФЭУ с учетом специфики решаемой физической задачи и отбор конкретных экземпляров для работы в составе фоторегистрирующей аппаратуры;
- разработка амплитудного дискриминатора с учетом особенностей выходных сигналов ФЭУ;
- разработка счетчика ОИ под конкретную физическую задачу.

Известны системы счета фотонов, в которых в качестве фотодетектора используется лавинный фотодиод [2]. Однако для работы в видимом и ультрафиолетовом диапазонах волн наиболее подходящими приборами до настоящего времени остаются ФЭУ. Их достоинствами являются достаточно высокий квантовый выход (до 30%), большой коэффициент усиления фототока ($10^5 - 10^8$), низкий уровень собственных шумов, практически неограниченный срок службы. К недостаткам этих приборов следует отнести довольно высокое напряжение питания (1 – 3 кВ), сравнительно большие габариты, наличие импульсов последствия.

Основными параметрами ФЭУ, влияющими на точность измерений в режиме счета фотонов, являются квантовый выход, частота следования импульсов темнового тока и дрейф этих параметров за время измерения относительно средних значений [3]. Под квантовым выходом понимается отношение среднего числа ОИ, превышающих порог дискриминации, к среднему числу фотонов, поступающих на фотокатод ФЭУ, а под частотой следования импульсов темнового тока – среднее число импульсов темнового тока, превышающих порог дискриминации за одну секунду.

Одним из существенных недостатков ФЭУ является большой разброс основных одноэлектронных параметров от экземпляра к экземпляру. Так, квантовые выходы ФЭУ, выпущенных одной партией, могут отличаться на порядок, а частота следования импульсов темнового тока – на три-четыре порядка. Это обстоятельство приводит к необходимости тщатель-

ного исследования характеристик ФЭУ в режиме счета фотонов и отбора экземпляров с требуемыми одноэлектронными параметрами.

С целью исследования возможностей использования различных типов ФЭУ в системах счета фотонов автором был разработан автоматизированный стенд [4], на котором исследовались темновые и световые счетные характеристики, амплитудные распределения импульсов, а также временные зависимости частоты выходных импульсов ФЭУ после включения питания и постоянной подсветки. Всего было исследовано более 100 экземпляров ФЭУ следующих типов: ФЭУ-71, -79, -104, -106, -130, -136, -147. Анализ полученных результатов позволил разработать методику отбора одноэлектронных ФЭУ и выработать рекомендации по использованию различных типов ФЭУ в лидарных системах различного назначения [5]. Основные параметры ФЭУ приведены в табл. 1.

Квантовый выход перечисленных ФЭУ, имеющих мультищелочные фотокатоды, в среднем примерно одинаков и лежит в пределах 1–10% [1]. Анализ данных табл. 1 позволяет сделать правильный выбор типа ФЭУ для конкретной лидарной системы. Так, например, ФЭУ-71 малоприспособны для работы в системах счета фотонов из-за высокого уровня собственных шумов. Резкие «всплески» темнового тока у ФЭУ-136 также делают их малоприспособными для использования, за исключением отдельных экземпляров. ФЭУ-79 и ФЭУ-106 целесообразно использовать для регистрации очень слабых оптических сигналов, например в КР-лидаре, где требуется обеспечить максимальное отношение сигнал-шум. Для проведения как относительных, так и абсолютных измерений лучше всего подходят ФЭУ-104, -106, -130 и -147, имеющие наименьший дрейф квантового выхода. В некоторых случаях улучшить одноэлектронные характеристики приборов и снизить погрешность измерений позволяет учет конструктивных особенностей ФЭУ [6].

Таблица 1

Тип ФЭУ	Частота следования импульсов темнового тока, имп/с	Дрейф темнового тока за 1 ч, раз	Дрейф квантового выхода за 1 ч, %
ФЭУ-71	> 1000	1–5	1–10
ФЭУ-79	> 10	1–3	1–10
ФЭУ-104	> 50	1–2	0,1–5
ФЭУ-106	> 10	1–2	0,2–5
ФЭУ-130	> 100	1–2	0,2–2
ФЭУ-136	> 50	1–100	0,2–5
ФЭУ-147	> 200	1–2	0,1–1

Существенное влияние на стабильность параметров фоторегистрирующей аппаратуры оказывает дрейф напряжения питания ФЭУ и порога дискриминации в амплитудном дискриминаторе. Экспериментально установлено, что для исключения влияния этих факторов на характеристики аппаратуры достаточно обеспечить стабильность питающего напряжения ФЭУ не менее 0,5%, а порога дискриминации – не менее 1% от установленных значений. Для питания ФЭУ в разработанных автором системах счета фотонов используется усовершенствованный источник питания [7], имеющий следующие технические характеристики:

Диапазон выходных напряжений	50–3000 В;
Выходной ток	1 мА;
Уровень пульсаций выходного напряжения	не более 1 В;
Дрейф выходного напряжения относительно установленного значения за 1 ч	не более 0,1%.

Следующим этапом проектирования фоторегистрирующей аппаратуры является разработка амплитудного дискриминатора с учетом особенностей выходных сигналов ФЭУ. Известно, что наличие конструктивных емкостей анодной камеры и индуктивностей выводов ФЭУ приводит к возникновению паразитных колебаний на «хвосте» ОИ, имеющих амплитуду до 30% от амплитуды ОИ [1]. Это приводит к появлению на выходе дискриминатора двух-трех импульсов в ответ на один ОИ. Наиболее простым и эффективным способом борьбы с паразитными колебаниями является правильное формирование полосы пропускания предварительного усилителя импульсов фототока ФЭУ. Экспериментальным образом установлено, что для перечисленных типов ФЭУ ограничение полосы пропускания сверху на уровне 25–30

МГц позволяет сгладить форму ОИ на выходе усилителя и избавиться от искажений, вызванных паразитным звеном анодной камеры ФЭУ [8].

На основании результатов исследования особенностей ОИ у указанных типов ФЭУ разработан амплитудный дискриминатор со следующими техническими характеристиками:

Входное сопротивление	3–10 Ом;
Коэффициент преобразования	не менее 12 мВ/мкА;
Полоса пропускания по уровню 3 дБ	100 Гц–30 МГц;
Дрейф порогового напряжения относительно установленного значения за 1 ч	не более 1%;
Длительность ОИ по полувысоте на выходе усилителя	15 нс;
Длительность импульсов на выходе дискриминатора	10 нс;
Полярность и уровень выходных импульсов дискриминатора	+ – ЭСЛ.

При разработке счетчиков ОИ принимаются во внимание такие характеристики, как энергия и длительность лазерного импульса, излучаемого в атмосферу, частота следования импульсов лазера, уровни фонового шума атмосферы и собственных шумов фоторегистрирующей аппаратуры, требуемое временное разрешение аппаратуры и скорость обмена данными между счетчиком ОИ и ЭВМ. Для лидарных систем различного назначения автором разработано четыре типа счетчиков ОИ [9–11]. Их основные технические характеристики приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип счетчика	РС 2	РС 3-4	РС 4	РС 5
Число каналов	1–4	4	8	8
Число стробов в одном канале	256–4096	4096	64	1024
Длительность строба, нс	80	80–320	10	10
Максимальная частота счета ОИ, МГц	10	50	50	50

Разработанные методика отбора ФЭУ и фоторегистрирующая аппаратура внедрены на пяти лидарных комплексах:

- 1) на мобильном КР-лидаре для измерения профилей температуры, влажности и исследования аэрозольно-газовых выбросов на выходах труб промышленных установок;
- 2) на поляризационном лидаре «Стратосфера-1 М»;
- 3) в КР-канале лидара с диаметром приемного зеркала 2,2 м для комплексных исследований атмосферы;
- 4) на лидаре с диаметром приемного зеркала 1 м для исследования вертикальной стратификации атмосферного аэрозоля;
- 5) на мобильной станции экологического контроля атмосферы г. Хабаровска.

Таблица 3

Тип лидара	Фотодетектор	Счетчик ОИ
Мобильный КР-лидар, 1987	ФЭУ-104, ФЭУ-79	четырёхканальный РС 2 и РС 4
«Стратосфера-1 М», 1988	ФЭУ-130	РС 3-4
Лидар с диаметром зеркала 2,2 м, 1980	ФЭУ-106	РС 3-4
Лидар с диаметром зеркала 1 м, 1986	ФЭУ-130	одноканальный РС 2
Мобильная станция, 1994	ФЭУ-104, ФЭУ-79	РС 5

В табл. 3 представлены данные об использованных компонентах для систем счета фотонов различных лидаров с указанием года начала эксплуатации этих систем. Опыт эксплуатации разработанных систем счета фотонов в указанных лидарах показал их хорошую надежность и подтвердил их высокие технические характеристики.

1. Ветохин С.С., Гулаков И.Р., Перцев И.В. и др. Одноэлектронные фотоприемники. М.: Атомиздат, 1979. 192 с.
2. Antill Jr.S.W., Holloway R.M. Characterization of avalanche photodiodes for Lidar atmospheric return signal detectors./SPIE. Infrared Technology XIV. 1988. V. 972. P. 26–32.
3. Глазов Г.Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 310 с.
4. Шелефонтюк Д.И. // Приборы и системы управления. 1992. N 3. С. 37–38.
5. Шелефонтюк Д.И. Исследование влияния характеристик приемно-измерительного тракта КР-лидара на точность измерения параметров атмосферы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск: ТАСУР, 1993. 24 с.

6. Шелефонтьук Д.И. //1-й Межреспубликанский симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. (Тезисы докл.) Томск.: ИОА СО РАН, 1994. Ч. 2. С. 223–224.
7. Климов В.Н., Корольков В.А. // Приборы и техника эксперимента. 1988. N 2. С. 202–204.
8. Шелефонтьук Д.И. // Приборы и техника эксперимента. 1992. N 5. С. 167–170.
9. Бурков В.В., Шелефонтьук Д.И. // 8-й Всесоюзный симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. (Тезисы докл.). Томск.: ИОА СО РАН, 1989. Ч. 2. С. 216.
10. Бурков В.В., Шелефонтьук Д.И. // Результаты комплексных исследований «Вертикаль-86» и «Вертикаль-87», Томск.: ТНЦ СО АН СССР, 1989. С. 95–98.
11. Шелефонтьук Д.И. // 1-й Межреспубликанский симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. (Тезисы докл.). Томск.: ИОА СО РАН, 1994. Ч. 2. С. 143–144.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
30 декабря 1994 г.

D. I. Shefontuk. Photon Counting Systems for Laser Sounding of Atmosphere.

The problems of photodetection instrumentation designed for use in lidar investigations are treated in the paper. The experimental results are discussed obtained by the author when investigating the characteristics of photomultiplier operation in photons count mode. Instructions for use of the photomultipliers in lidars of various purposes are given. The problems of design of amplitude discriminator and counters of one-electron pulses are treated. Specifications of the photon counting systems are presented.