

Б.В. Кауль, О.А. Краснов, А.Л. Кузнецов

### КОРРЕКЦИЯ ЛИДАРНЫХ СИГНАЛОВ НА ШУМ ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ ФЭУ

Измерены параметры, позволяющие описать избыточный шум ФЭУ-130, возникающий в результате воздействия на его элементы потока электронов. Показано, что этот шум, называемый последствием, необходимо учитывать при обработке сигналов лазерного зондирования.

В фотоэлектронных умножителях помимо термоэмиссии существует шум, возникающий в результате воздействия темнового и сигнального тока на остаточные газы и элементы конструкции ФЭУ [1]. Этот шум, называемый последствием, проявляется в ФЭУ, работающем в режиме счета фотонов, в виде импульсов, которые имеют те же параметры, что и импульсы, обусловленные выходом фотоэлектронов. Момент выхода импульса последствия  $\tau$ , отсчитанный от момента прохождения вызвавшего его импульса действия, носит вероятностный характер и описывается некоторой функцией плотности вероятности:

$$\varphi(\tau) = P\psi(\tau), \quad (1)$$

где  $P$  — вероятность появления импульса последствия, а  $\psi(\tau)$  — функция, нормированная условием

$$\int_0^{\infty} \psi(\tau) d\tau = 1. \quad (2)$$

Если поток импульсов фотоэлектронов описывается функцией  $f(t)$ , то реакция на этот поток  $F(t)$  описывается следующим уравнением:

$$F(t) = f(t) + P \int_0^t F(t-\tau) \psi(\tau) d\tau. \quad (3)$$

В лидарных сигналах, имеющих большой динамический диапазон, искажения вследствие последствия могут играть значительную роль. На это обстоятельство уже указывалось в [2, 3]. В [4] исследовались характеристики последствия одного из типов ФЭУ (RCA 8852) и расчетным методом показано, что при вертикальном зондировании сигнал и медленный компонент последствия становятся равными на высоте около 30 км, а выше шум последствия превышает сигнал. Этот пример убедительно демонстрирует актуальность коррекции сигналов на последствие при зондировании верхних слоев атмосферы. Впрочем, то же самое можно сказать о зондировании на малых дистанциях, где сигнал имеет большой динамический диапазон на временном интервале, сравнимом с характеристическим временем интенсивного быстрого компонента последствия.

Для коррекции необходимо знать плотность вероятности выхода импульса последствия, определенную выражением (1). Поскольку эта характеристика не приводится в паспортах изготовителей ФЭУ, требуется ее экспериментальная оценка для каждого ФЭУ, применяемого в лидаре.

Ниже описывается простая методика, примененная нами для оценки характеристик последствия детекторов лидара, предназначенного для зондирования стратосферных аэрозолей и исследования поляризации обратно рассеянного излучения [5]. Детекторы и регистрирующая аппаратура лидара работают в режиме счета фотонов. Быстродействие счетной аппаратуры характеризуется максимальной скоростью счета по периодической последовательности импульсов и составляет 25 МГц. Минимальный дискрет (строб) времени составляет 40 нс. Задержка включения счетчика по отношению к стартовому импульсу регулируется от нуля до 100 мкс.

Последствие ФЭУ исследовалось непосредственно на измерительном комплексе лидара. Для этого оптический канал лидара засвечивался коротким (300 нс) световым импульсом светодиода. Регулировкой импульса тока и введением оптического ослабления устанавливалась такая интенсивность светового потока, что он воспринимался регистрирующей аппаратурой как последовательность одноэлектронных импульсов со средней скоростью поступления около 1 МГц. Это позволяло пренебречь просчетами, возникающими из-за конечного временного разрешения счетчика фотонов. Генератор импульса тока, питающего светодиод, и счетчик фотонов запускались одним стартовым импульсом. За-

держка запуска счетчика устанавливалась на нуль. Фотоны подсветки регистрировались в первых четырех стробах длительностью 80 нс каждый. В последующих стробах регистрировались импульсы темнового тока и избыточного шума, обусловленного последствием. Общая длительность стробов составляла 128 мкс. Дальнейший анализ показал, что за это время скорость поступления импульсов последствия убывает до значения, сравнимого со скоростью поступления темновых импульсов, которая для двух исследованных ФЭУ-130 была порядка  $2 \cdot 10$  имп/с. Для получения статистически обоснованных отсчетов в каждом стробе, а особенно в последних, производилось накопление при 10 вспышках светодиода. Из полученных в  $i$ -м стробе отсчетов  $N_i$  вычиталась величина ожидаемых импульсов темнового тока  $\Delta N_{d,i}$ :

$$\Delta N_{d,i} = \bar{n}_d m \Delta t_i,$$

где  $\bar{n}_d$  — средняя скорость поступления темновых импульсов;  $m$  — число вспышек светодиода;  $\Delta t_i$  — длительность  $i$ -го строба.

Некоторая проблема возникает в связи с конечным временем жизни электроннодырочных пар в светодиоде. По этой причине после прекращения импульса тока в течение некоторого времени происходит релаксационная рекомбинация неравновесных носителей заряда с излучением фотонов. Для учета этого фактора по заднему фронту достаточно мощного светового импульса, такого, что его можно наблюдать на осциллографе, оценивалось характеристическое время релаксации  $\theta$ . Оно оказалось равным 50 нс. При обработке результатов из отсчетов в  $i$ -м стробе вычиталось расчетное значение ожидаемой засветки

$$\Delta N_{l,i} = N_0 \Delta t_i \exp(t_i/\theta) / \Delta t_0,$$

где  $N_0$  — число фотоотсчетов, накопленных в первых четырех стробах (стробы, регистрирующие подсветку);  $\Delta t_i$  — длительность  $i$ -го строба;  $t_i$  — положение  $i$ -го строба на оси времени. Действие релаксационного высвечивания уменьшается до пренебрежимых величин за время менее одной микросекунды.

Для дальнейшей обработки результатов исходным является ряд исправленных отсчетов

$$N'_i = N_i - \Delta N_{d,i} - \Delta N_{l,i}.$$

Этот ряд является дискретным представлением функции  $F(t)$ , входящей в уравнение (3), которое решается путем последовательных приближений. В качестве нулевого приближения принимается

$$P = \sum_{i=5}^n N'_i / \sum_{i=1}^4 N'_i; \psi_j = N'_j / \Delta t_j \sum_{j=1}^{n-4} N'_j,$$

где  $j = i - 4$ .

Вычисленные ряды значений функции плотности вероятности для двух исследованных ФЭУ-130 хорошо аппроксимируются суммой двух экспоненциальных членов:

$$\varphi(\tau) = P[c_1 \exp(-\tau/\tau_1) + c_2 \exp(-\tau/\tau_2)]$$

при следующих значениях параметров:

$$P = 0,052; c_1 = 0,48 \text{ мкс}^{-1}; \tau_1 = 1,49 \text{ мкс}; \\ c_2 = 5,9 \cdot 10^{-3} \text{ мкс}^{-1}; \tau_2 = 51 \text{ мкс}.$$

Полученные нами данные качественно совпадают с результатами [4] в том отношении, что оказывается возможным выделение быстрого и медленного компонентов шума последствия. Характеристические времена затухания имеют отличные от [4] значения. Так, для медленного компонента нами получено  $\tau_2 = 51$  мкс, в [4] — 60 мкс. Полные вероятности выхода импульса последствия для двух измеренных экземпляров ФЭУ отличались незначительно (0,050 и 0,053). На долю быстро затухающего компонента ( $\tau_1 = 1,49$ ) приходится около 70% всех возникающих импульсов последствия. При зондировании высоких слоев атмосферы, когда протяженность пространственного строба значительно превышает  $c\tau_1/2$ , а динамический диапазон сигнала в двух соседних стробах невелик, влияние быстрого компонента незначительно. Оно заключается в том, что к сигналу добавляется избыточный шум, пропорциональный самому сигналу при коэффициенте пропорциональности около 0,04. Влияние медленного компонента существенно сказывается на точности измерения сигнала с больших высот и требует в соответствии с уравнением (3) коррекции измеренного потока  $F(t)$  для

оценки его истинного значения  $f(t)$ . Пренебрежение фактором последствия может привести к ошибкам, исчисляемым десятками процентов.

1. Перцев А.Н., Писаревский А.Н. Одноэлектронные характеристики ФЭУ. Атомиздат, 1971. 151 с.
2. Schuster B.G., Fruch C.L. //Rev. Sc. Instr. 1970. V. 41. № 9. P. 1638–1643.
3. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. //Изв. вузов. Сер. Физика. 1973. № 10. С. 144–146.
4. Iikura Y., Sugimoto N., Sagano Y., Shimzu H. //Appl. Opt. 1987. V. 26. № 24. P. 5299–5306.
5. Second International Lidar Researchers Directory /compiled by M. P. Mc. Cormick/ Atmospheric Science Division NASA. 1989. P. 64.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,  
Томск

Поступило в редакцию  
4 июня 1990 г.

**B. V. Kaul, O. A. Krasnov, A. L. Kuznetsov. Correction of Lidar Returns for the PMT's Afterpulsing Noise.**

The parameters are measured that allows one to describe an excess noise of the PMT (FEU-130) occurring due to the effect of electron flux on the PMT's construction elements. It is shown that this noise, called the afterpulsing noise, should be taken into account when processing lidar returns.