

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ  
ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЧЕТЧИКА КОРРЕЛЯЦИЙ© 2023 г. М. В. Казачек<sup>а,\*</sup><sup>а</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН  
Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43

\*e-mail: mihail@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 22.12.2022 г.

После доработки 02.02.2023 г.

Принята к публикации 03.02.2023 г.

Систематическая ошибка измерения длительности вспышек счетчиком корреляций, построенным нами ранее на основе цифрового осциллографа и компьютера, уменьшена на 1–2 нс путем математической обработки входных импульсов и коррекции времен их регистрации. Разброс измерения длительности и задержки вспышек не меняется при включении коррекции. Методика протестирована на модельных вспышках, уточнено время вспышек сонолюминесценции. Счетчик может применяться для измерения других быстропротекающих событий, например в ядерной физике.

DOI: 10.31857/S003281622304002X, EDN: SUKBHP

Длительность быстропротекающих процессов, сопровождающихся излучением квантов, измеряется с помощью аналоговых и цифровых устройств, использующих статистические свойства сигнала, — счетчиков корреляций. Нашей целью было уточнить длительность вспышек сонолюминесценции, измеряемую счетчиком корреляций, созданным нами на основе цифрового осциллографа и компьютера [1, 2]. Явление сонолюминесценции описано, например, в работах [3, 4]. Разрешения 2 нс достаточно для измерения длительности вспышек светодиодов и в некоторых режимах многопузырьковой сонолюминесценции [1], но не хватает для измерения таких режимов сонолюминесценции, где длительность вспышек 60–250 пс [5].

В данной работе вспышки анализировали с помощью фотоумножителей (ФЭУ-100, ФЭУ-79, ФЭУ-130, ФЭУ-84), работающих в режиме счета фотонов. Два ФЭУ подключены к двум входам осциллографа RIGOL DS1104, в цепи одного канала стоит линия задержки. Анодной нагрузкой ФЭУ служит низкоомный подстраиваемый резистор (100 Ом). В большинстве тестов использована пара ФЭУ-100–ФЭУ-79, питающее напряжение 1700 В. Осциллограф оцифровывает амплитуду в масштабе ~0.07 мВ на точку при размахе шкалы 256 точек (1 байт). Шумовые импульсы имеют амплитуду до 10 точек, полезные ограничиваются порогом 15–20 точек, задаваемым в программе. Осциллограф оцифровывает время с шагом 2 нс на точку. В считываемых сигналах вы-

деляли импульсы и получали корреляционные функции [1, 4]. Если импульсы следовали пакетами, то корреляционная функция имела вид пика. Ширину вспышки (пакета)  $W$  получали как ширину на полувысоте гауссова заполнения корреляционного пика. Ширина вспышки связана с длительностью соотношением  $W = T\sqrt{2}$  [4]. В измеряемую ширину  $W$  вносит вклад “собственная ширина” — систематическая ошибка  $W_0$  и случайная ошибка  $W_1$ :  $W^2 = W_{\text{ист}}^2 + W_0^2 + W_1^2$ , где  $W_{\text{ист}}$  — истинная ширина. Полагаем, что  $W_0^2 = W_{0\text{ц}}^2 + W_{0i}^2 + W_{0j}^2$ , где  $W_{0\text{ц}}$  — ширина, вносимая оцифровкой;  $W_{0i}$ ,  $W_{0j}$  — ширины, вносимые каждым из двух ФЭУ. Для улучшения временных характеристик прибора надо найти и уменьшить  $W_0$  и  $W_1$ . Заметим, что если точно знать  $W_0$ , то решающую роль будет играть  $W_1$ .

В работе [1] дискретное время  $n$  прихода импульса определялось по пересечению передним фронтом заданного порога  $g$ : условия  $f(n-1) \geq g$  и  $f(n) < g$ . Здесь  $f$  — сигнал, отрицательные импульсы от ФЭУ, вызванные фотонами на фотокатоде. Математические способы коррекции времени регистрации импульса в счетчиках корреляций хорошо описаны в работе [6]. Это учет максимума импульса, центра масс импульса, сравнение импульса с образцом, несколько вариантов интерполяции переднего фронта и др. [6]. Отмечено, что можно получить разрешение по времени вдвое меньшее, чем шаг оцифровки.

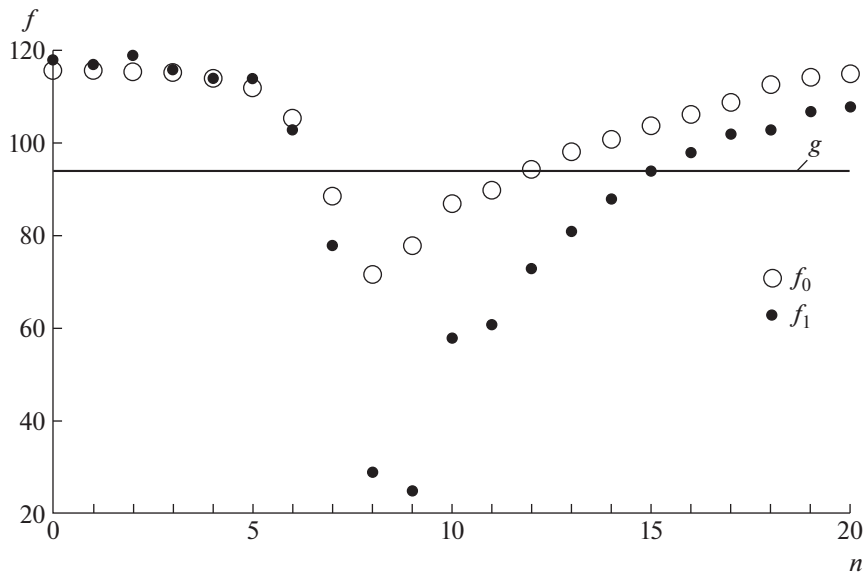


Рис. 1. Образцовый усредненный импульс  $f_0$  и очередной импульс  $f_1$  в дискретной шкале времени  $n$  и амплитуды  $f$ , порог  $g$ .

В работе были применены четыре способа коррекции:  $\Phi$  – сравнение импульса с образцом усредненной формы,  $A$  – коррекция момента пересечения порога по амплитуде импульса,  $\Gamma$  – сравнение переднего фронта с образцом,  $D$  – поправка по двум точкам фронта сигнала и образца. Во всех случаях для уточнения  $t_i$  импульса  $i$  к целому числу временных интервалов  $n_i$  прибавлялось дробное число вычисленной коррекции  $k_i$ :

$$t_i = n_i + k_i \tag{1}$$

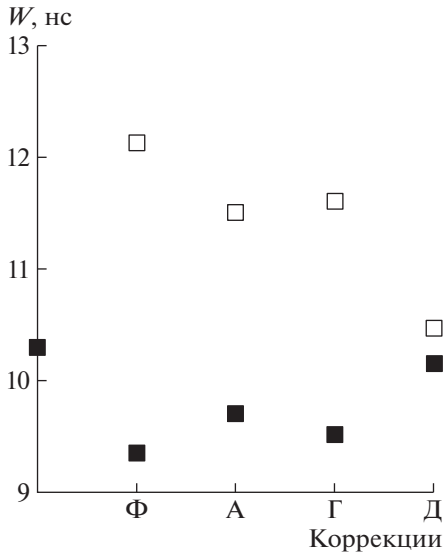
после чего  $t$  умножалось на  $m$  и округлялось до целого. Как показали опыты, значения  $k$  имеют разный знак и часто  $|k| > 0.5$ , поэтому улучшения разрешения по времени следует ожидать даже при  $m = 1$ . Практически мы использовали величины растяжки  $m$  до 10.

Поясним алгоритмы на примере рис. 1. Усредненный образец  $f_0$  пересекает порог  $g$  при  $n = 7$ . Импульс  $f_1$  также регистрируется в момент  $n = 7$ . Видно, что он сдвинут вправо относительно образца  $f_0$ , и его амплитуда  $a_1$  примерно вдвое больше амплитуды образца  $a_0$ . Для коррекции  $\Phi$  мы нормируем импульсы, вычисляем среднеквадратичное отклонение по оси  $f$  импульса от образца (в нашем случае по 20 точкам, это примерно полная ширина импульса), сдвигаем его в разные стороны на переменную  $k$  с уменьшающимся шагом, используя метод золотого сечения. Через несколько итераций сдвиг становится достаточно мал, и мы получаем величину коррекции  $k$ , дающую минимум среднеквадратичного отклонения. Для коррекции  $A$  мы используем формулу  $k = 0.36w(1 - a_0/a_1)$ , где  $w$  – ширина пика на полу-

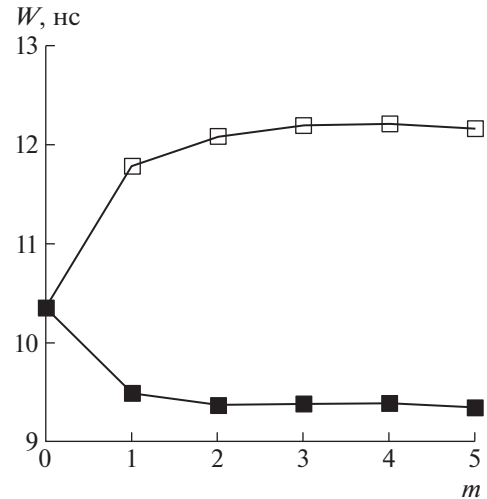
высоте. Эта формула хорошо аппроксимирует зависимость сдвига положения пика от отношения амплитуд модельных импульсов гауссовой формы. Для коррекции  $\Gamma$  мы применяем итерационную процедуру, подобную  $\Phi$ , но только по переднему фронту до максимума импульса. Для коррекции  $D$  по двум точкам 6 и 7 мы применяем формулу  $k = (f(6) - g)/(f(6) - f(7)) - (f_0(6) - g)/(f_0(6) - f_0(7))$ , используя соотношение подобия треугольников.

Алгоритмы протестированы в трех сериях измерений: вспышек светодиода, “синхронных импульсов”, сонолюминесценции. Эффективность коррекций оценивали по уменьшению измеряемых ширин вспышек по сравнению с некорректированными и увеличению ширин при намеренном изменении знака коррекции  $k$  с плюса на минус в формуле (1).

Вспышки светодиода (зеленый, InGaN типа BL-L333PGC) измерялись от генератора DG4062 в режиме импульсов, длительность 18 нс (фронты 11 нс), амплитуда 11 В. На светодиод подан разнополярный электрический импульс, и порог возникновения свечения достигается на части его ширины, поэтому  $W \sim 10$  нс. На рис. 2 показаны ширины вспышек, измеренные без коррекции (точка на вертикальной оси) и с коррекциями  $\Phi$ ,  $A$ ,  $\Gamma$ ,  $D$ , с положительными и отрицательными значениями  $k$ . Видно, что коррекции с правильным знаком уменьшают измеряемую ширину вспышки, а с неправильным – увеличивают ее примерно вдвое. Лучше всех работает коррекция  $\Phi$ , она уменьшает  $W$  приблизительно на 1 нс. На рис. 3 показаны ширины вспышек, измеренные с



**Рис. 2.** Ширина вспышки светодиода без коррекции (точка на вертикальной оси) и с разными видами коррекций: Ф, А, Г, Д;  $m = 3$ ; темные точки – положительный знак коррекции, светлые точки – отрицательный.



**Рис. 3.** Ширина вспышки светодиода без коррекции ( $m = 0$ ) и с коррекцией Ф с разными  $m$ ; темные точки – положительный знак коррекции, светлые точки – отрицательный.

коррекцией Ф с разными значениями  $m$ , также с положительными и отрицательными значениями  $k$ . Результаты при  $m = 10$  не сильно отличались от результатов при  $m = 5$ . Видно, что достаточно использовать  $m = 2$ . Очевидно,  $W_0 \ll 9.3$  нс.

Положение пика корреляций определяется длиной линии задержки. При включении коррекции оно изменялось в пределах 2 нс. В нашем случае эта величина не существенна, но она имеет большое значение при измерении относительных задержек вспышек.

Случайная ошибка  $W_1$  оценена как среднее отклонение  $W$  в сериях по 20-ти измерениям вспышек светодиода. При увеличении длительности каждого измерения в 4 раза  $W_1$  уменьшалась приблизительно в 2 раза, что соответствует статистической закономерности. При числе корреляций в пике порядка 1300 на измерение (амплитуда корреляционного пика порядка 220) среднее отклонение ширины пика составило  $W_1 \sim 0.2$  нс, положения пика –  $W_1 \sim 0.1$  нс. При дальнейшем накоплении измерений величина  $W_1$  уменьшалась, по нашей оценке, до значений  $W_1 < 0.1$  нс. Величина  $W_1$  не зависела от включения коррекции.

“Синхронные импульсы” измерялись при подключении ФЭУ к одному каналу осциллографа и, через линию задержки, к другому. Собственная нестабильность ФЭУ в данном эксперименте не учитывалась, оценивалась только нестабильность цепей оцифровки  $W_{0ц}$ . На рис. 4 показаны ширины корреляционных пиков, измеренные с разными коррекциями и разным пара-

метром  $m$ . При использовании коррекций Ф, Г, Д величины  $m = 4$  достаточно. Без коррекции (точка на вертикальной оси)  $W_{0ц} = 1.7$  нс, с коррекцией Ф  $W_{0ц} = 0.6$  нс.

Сонолюминесценция (длины волн 300–500 нм) получена от воды, насыщенной аргоном, при частоте ультразвука 20 кГц и мощности 16 Вт. На рис. 5 показаны измеренные ширины  $W$  вспышек сонолюминесценции без коррекции (точка на вертикальной оси) и с коррекциями. Измеренная  $W$ , а значит, и собственная ширина, вносимая счетчиком  $W_0$ , уменьшается при включении коррекции Г или Ф приблизительно на 2 нс до значений  $W_0 < 2.5$  нс.

Собственную ширину  $W_0$ , вносимую счетчиком, можно непосредственно измерить на вспышках заведомо меньшей, чем  $W_0$ , ширины, например, от однопузырьковой сонолюминесценции или пикосекундного лазера. Однако проблема поиска таких источников света вынуждает применять иные способы калибровки нашего счетчика корреляций. Имея несколько пар ФЭУ, можно измерить ширину  $W_{ij}$  одного и того же процесса, где  $i, j$  – номера ФЭУ. Задача сводится к решению системы неоднородных линейных уравнений  $W_{ij}^2 = W_{ист}^2 + W_{0ц}^2 + W_{0i}^2 + W_{0j}^2$ , если пренебречь  $W_1$ . При числе ФЭУ больше трех число уравнений оказывается больше числа неизвестных. Такая система не решается однозначно. Полагая  $W_{ист}^2 + W_{0ц}^2 = 0$  и решив систему уравнений, оценим верхнюю границу  $W_{0i}$  для каждого ФЭУ (табл. 1). Лучшими оказались ФЭУ-79, менее пригодны ФЭУ-100, ФЭУ-130 и ФЭУ-84. Задава-

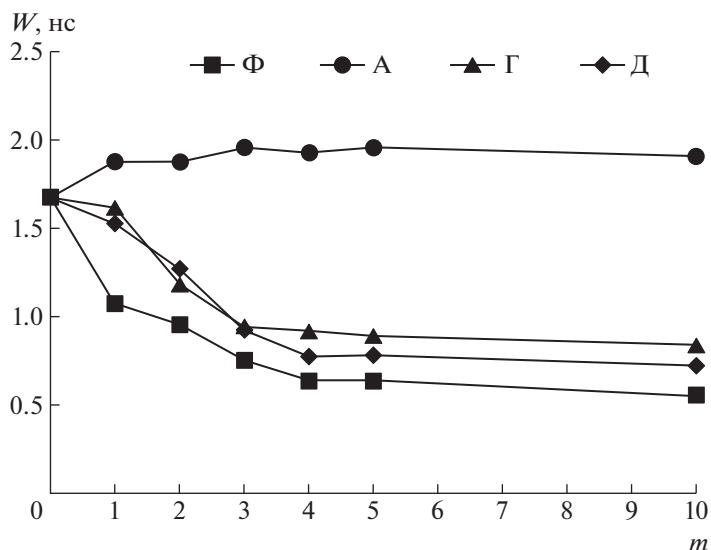


Рис. 4. Ширина пика корреляционной функции “синхронных импульсов” без коррекции ( $m = 0$ ), с разными коррекциями и  $m$ .

ясь величиной  $W_{ист} = 0.25$  нс, полученной для схожих условий солюминесценции [7], и  $W_{0ц}$ , найденной выше, можно уточнить  $W_{0i}$ . По нашей оценке, ширина вспышки солюминесценции воды менее 1 нс.

Как отмечено в работе [4], медленный канал связи осциллографа с компьютером приводит к временной эффективности счетчика 0.1%. Проблема частично решена в осциллографах, имеющих встроенный жесткий диск. Для того чтобы не пересылать неинформативные массивы сигнала,

целесообразно дать рекомендации разработчикам цифровых осциллографов. Как из имеющихся функций осциллографа получить корреляционный анализ? Какие функции добавить в осциллограф? Обратит внимание на условия триггерирования. В осциллографе RIGOL DS1104 есть опциональный триггер по величине задержки импульса в разных каналах, это может позволить получать корреляции по частоте триггерных событий от величины задержки. Наиболее важна возможность вычислять времена между импульсами и накапливать их в памяти осциллографа.

Предложена методика математической обработки импульсов и коррекции времен их регистрации. При этом систематическая погрешность, вносимая счетчиком корреляций, уменьшается на 1–2 нс. Применен оригинальный способ сравнения позитивного и негативного действия коррекции. Коррекция, включающая обработку нескольких точек сигнала (по форме импульса, по фронту импульса), более эффектив-

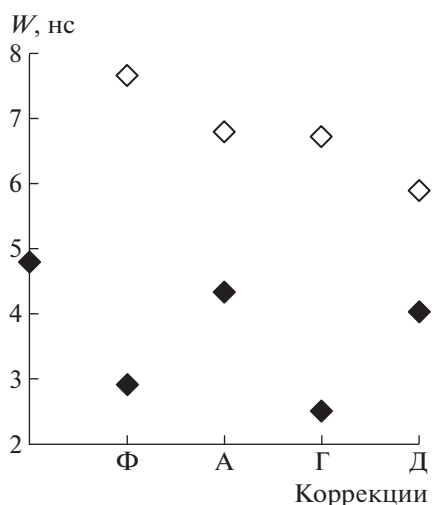


Рис. 5. Ширина вспышки при солюминесценции воды без коррекции (точка на вертикальной оси) и с разными видами коррекций: Ф, А, Г, Д;  $m = 2$ ; темные точки – положительный знак коррекции, светлые точки – отрицательный.

Таблица 1. Верхняя оценка собственной ширины, вносимой ФЭУ, по измерениям солюминесценции воды (использовано по два экземпляра ФЭУ-100 и ФЭУ-79)

$i$	Тип ФЭУ	$W_{0i}$ , нс
1	ФЭУ-100	<2.5
2	ФЭУ-100	<2.7
3	ФЭУ-79	<1.1
4	ФЭУ-79	<1.6
5	ФЭУ-130	<3.6
6	ФЭУ-84	<4.1

на, чем коррекция, берущая в расчет только 1–2 точки (амплитуду импульса или анализ момента пересечения порога).

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер: АААА-А20-120021990003-3.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Казачек М.В., Гордейчук Т.В.* // ПТЭ. 2019. № 1. С. 28. <https://doi.org/10.1134/S0032816219010117>
2. *Казачек М.В.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018619059 // Оpubл. 27.07. 2018.
3. *Walton A.J., Reynolds G.T.* // *Advances in Physics*. 1984. V. 33. № 6. P. 595. <https://doi.org/10.1080/00018738400101711>
4. *Гордейчук Т.В., Казачек М.В.* // *Оптика и спектроскопия*. 2020. Т. 128. № 10. С. 1492. <https://doi.org/10.21883/OS.2020.10.50020.169-20>
5. *Gompf B., Gunter R., Nick G., Pecha R., Eisenmenger W.* // *Physical Review Letters*. 1997. V. 79. № 7. P. 1405.
6. *Aavikko R.* Thesis ...Doctor from the Helsinki University of Technology. Speciality: Science in Technology. Helsinki, Finland. 2006. P. 17.
7. *Ko I., Kwak H.-Y.* // *Journal of Physical Society of Japan*. 2010. V. 79. № 12. P. 124401. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.79.124401>