

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ
ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЧЕТЧИКА КОРРЕЛЯЦИЙ© 2023 г. М. В. Казачек^{а,*}^аТихоокеанский 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 $W_0^2 = W_{\text{оц}}^2 + W_{0i}^2 + W_{0j}^2$, где $W_{\text{оц}}$ — 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.

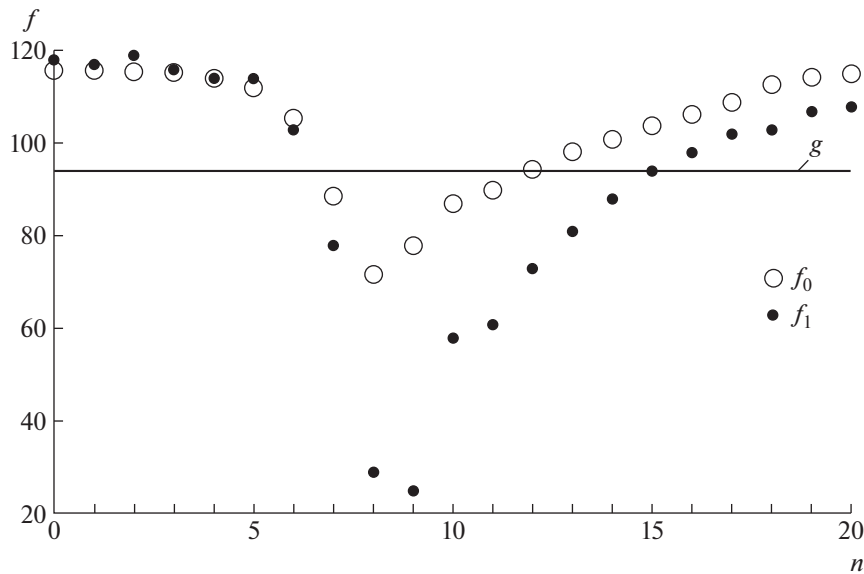


Рис. 1. Образцовый усредненный импульс f_0 и очередной импульс f_1 в дискретной шкале времени n и амплитуды f , порог g .

В работе были применены четыре способа коррекции: Φ — сравнение импульса с образцом усредненной формы, A — коррекция момента пересечения порога по амплитуде импульса, Γ — 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 :

$$t_i = n_i + k_i, \quad (1)$$

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 Φ 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 Γ мы применяем итерационную процедуру, подобную Φ , 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 Φ , A , Γ , 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 Φ , она уменьшает W приблизительно на 1 нс. На рис. 3 показаны ширины вспышек, измеренные с

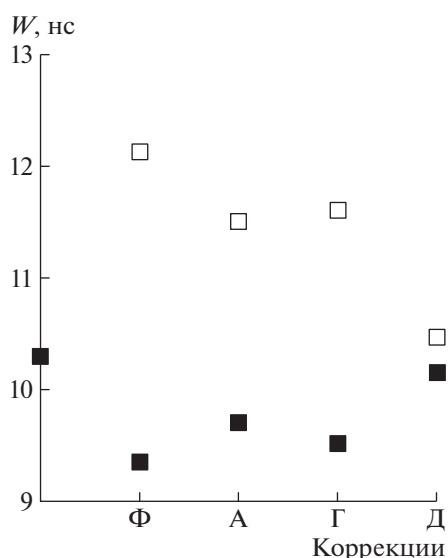


Рис. 2. Ширина вспышки светодиода без коррекции (точка на вертикальной оси) и с разными видами коррекций: Ф, А, Г, Д; $m = 3$; темные точки — положительный знак коррекции, светлые точки — отрицательный.

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-

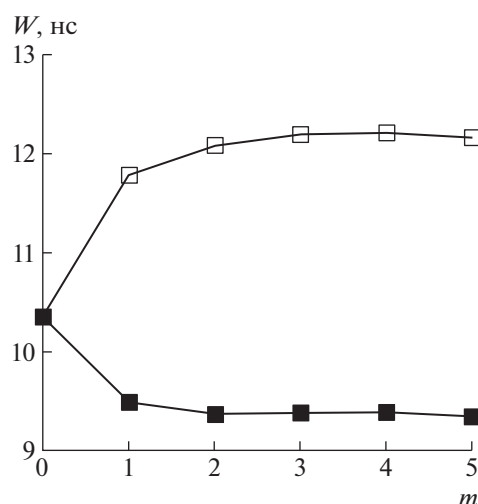


Рис. 3. Ширина вспышки светодиода без коррекции ($m = 0$) и с коррекцией Ф с разными m ; темные точки — положительный знак коррекции, светлые точки — отрицательный.

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 аргонном, 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-

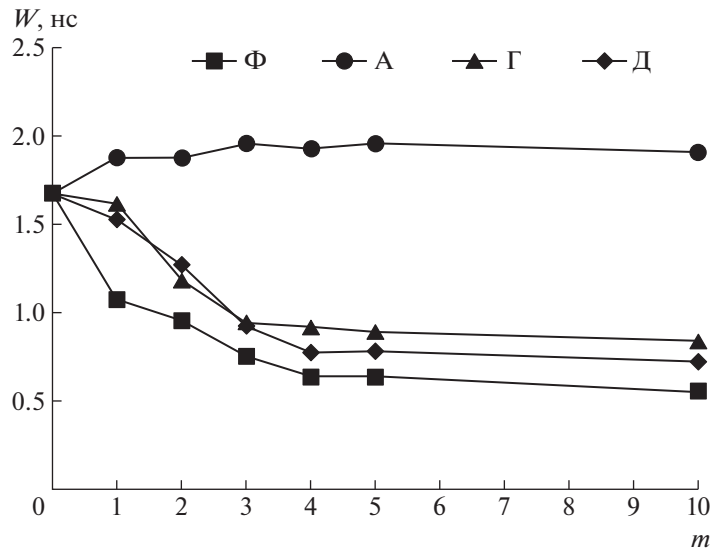


Рис. 4. Ширина пика корреляционной функции “синхронных импульсов” без коррекции ($m = 0$), с разными коррекциями и m .

ясь величиной $W_{\text{ист}} = 0.25$ нс, полученной для схожих условий сонолюминесценции [7], и $W_{0\text{ц}}$, найденной выше, можно уточнить $W_{0\text{г}}$. По нашей оценке, ширина вспышки сонолюминесценции 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-

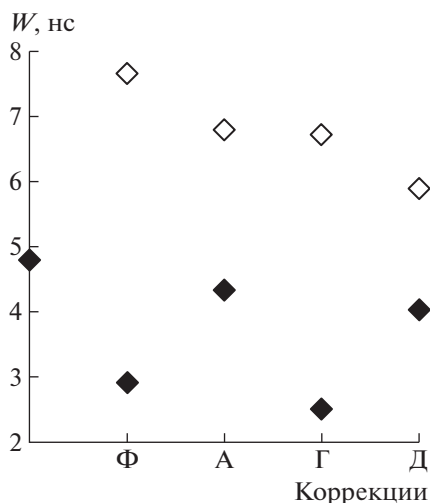


Рис. 5. Ширина вспышки при сонолюминесценции воды без коррекции (точка на вертикальной оси) и с разными видами коррекции: Ф, А, Г, Д; $m = 2$; темные точки – положительный знак коррекции, светлые точки – отрицательный.

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

i	Тип ФЭУ	$W_{0\text{г}}, \text{нс}$
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>