

УДК 621.383

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ОДНОКВАНТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

А.О. Зеневич

Высший государственный колледж связи, Минск, Беларусь

A METHOD OF MEASURING THE DISTRIBUTION  
OF SINGLE-PHOTON PULSES

A.O. Zenevich

Higher State College of Communications, Minsk, Belarus

Предложен способ, позволяющий повысить точность измерения статистического распределения однофотонных импульсов за счет устранения погрешности, вносимой темновыми импульсами.

**Ключевые слова:** однофотонный импульс, счетчик фотонов, статистическое распределение однофотонных импульсов.

The way to improve the accuracy of the measurement of the statistical distribution of single-photon impulses by eliminating the errors introduced by dark impulses is proposed.

**Keywords:** single photon pulses, photon counter, statistical distribution of single photon pulses.

**Введение**

Квантово-статистический подход в описании оптического излучения в настоящее время широко используется в оптике и квантовой электронике [1]. Он позволяет более детально разобраться в физических процессах и явлениях, протекающих в источниках и приемниках оптического излучения, а также в средах, в которых распространяется излучение. На основании статистического распределения однофотонных импульсов можно судить о квантовых статистических свойствах оптического излучения и определить некоторые характеристики фотоприемников [2]. Необходимо отметить, что существующие способы регистрации статистического распределения однофотонных импульсов не учитывают темновые импульсы фотоприемников, которые будут приводить к погрешности измерения статистического распределения однофотонных импульсов. Поэтому цель предлагаемой статьи – разработать способ, который позволяет исключить из результатов измерения темновые импульсы и тем самым повысить точность измерения статистического распределения однофотонных импульсов.

**1 Описание способа**

Сущность способа заключается в том, что вначале весь интервал измерения длительностью  $t$  делят на  $M_u$  подынтервалов равной длительности  $\Delta t$ , затем выполняется измерение количества импульсов на всем интервале в присутствии внешней подсветки счетчика фотонов, осуществляются подсчеты количества подынтервалов, на

которых не было зарегистрировано ни одного импульса, количества подынтервалов, на которых был зарегистрирован один импульс, и т. д., пока не пересчитают все подынтервалы. Затем проделывают те же действия и измерения, но в отсутствие оптического излучения.

Вероятности  $p_m(g)$  и  $p_{cm}(g)$  зарегистрировать  $g$  импульсов на выходе счетчика фотонов за время  $\Delta t$  в отсутствии и присутствии внешней подсветки определяются по следующим формулам:

$$p_m(g) = \frac{m_g}{M_u} \text{ и } p_{cm}(g) = \frac{m'_g}{M_u}, \quad (1.1)$$

где  $m_g$  и  $m'_g$  – количество подынтервалов, на которых зарегистрировано  $g$  импульсов в отсутствии и в присутствии внешней подсветки соответственно. Поскольку в реальном эксперименте за время  $\Delta t$  можно зарегистрировать только конечное число импульсов, то максимальное количество импульсов, зарегистрированных за  $\Delta t$ , равно  $K$  при наличии внешней подсветки и  $N$  в случае ее отсутствия. Тогда можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} m'_0 = m_0 p(0), \\ m'_1 = m_0 p(1) + m_1 p(0), \\ m'_2 = m_0 p(2) + m_1 p(1) + m_2 p(0), \\ \dots \\ m'_K = m_0 p(K) + m_1 p(K-1) + \dots + m_N p(K-N), \end{cases} \quad (1.2)$$

где  $m_0, m_1, \dots, m_N$  – соответственно количество подынтервалов, на которых зарегистрировано от нуля до  $N$  импульсов при затемнении фотоприемника,  $m'_0, m'_1, \dots, m'_K$  – соответственно

количество подынтервалов, на которых зарегистрировано от нуля до  $K$  импульсов включительно при подсветке фотоприемника,  $p(0), p(1), \dots, p(K-N)$  – соответственно вероятность регистрации нуля одноквантовых импульсов, одного одноквантового импульса и т. д. до  $K-N$  одноквантовых импульсов.

Матрица  $P$  системы (1.2) имеет порядок  $N$  и следующий вид:

$$P = \begin{bmatrix} m_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ m_0 & m_1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_0 & m_1 & m_2 & \dots & m_N \end{bmatrix}. \quad (1.3)$$

При этом число строк в матрице  $K$ , а число столбцов  $N$ . В случае, когда  $K > N$ , увеличивают число столбцов до  $K$ . При этом недостающие элементы матрицы заменяют нулями. После чего находят решение системы (1.2)

$$\begin{bmatrix} p(0) \\ \dots \\ p(g) \\ \dots \\ p(K) \end{bmatrix} = \frac{1}{\det P} \begin{bmatrix} P_{00} & \dots & P_{K0} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{0g} & \dots & P_{Kg} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{0N} & \dots & P_{KN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m'_0 \\ \dots \\ m'_g \\ \dots \\ m'_K \end{bmatrix}, \quad (1.4)$$

где  $\det P$  – определитель матрицы (1.2), а  $P_{01}, \dots, P_{KN}$  – алгебраические дополнения матрицы (1.2).

Измерив значения  $m_0, m_1, \dots, m_N$  и  $m'_0, m'_1, \dots, m'_K$ , на основании выражения (1.3) находим распределения одноквантовых импульсов.

## 2 Описание устройства

Способ реализован при помощи устройства, схема которого представлена на рисунке 2.1.

Устройство функционирует следующим образом. По приходу сигнала запуска таймера  $T$  этот же импульс обнуляет все счетчики импульсов и сдвиговый регистр. Таймер  $T$  задает временной интервал измерения длительностью  $t$  и запускает генератор  $\Gamma$ . Генератор разделяет весь интервал измерения на равные по длительности подынтервалы прямоугольными импульсами. Число подынтервалов подсчитывается счетчиком  $Сч$ . На тактирующие входы  $C$  триггера  $TP1$  и сдвигового регистра  $CP$  поступают импульсы с фотоприемника  $\Phi$  через усилитель импульсов  $У$  и дискриминатор  $Д$ , на вход  $D$  триггера  $TP1$  через резистор  $R$  подается постоянное напряжение  $U$ , которое поддерживает уровень, соответствующий логической единице на этом входе. С инвертирующего выхода триггера  $TP1$  на вход  $1$  логического элемента ЛИО подается уровень напряжения, соответствующий логической единице, пока на тактирующий вход  $C$  триггера  $TP1$  не поступит импульс с дискриминатора. Тогда  $TP1$  переключается и на его инвертирующем выходе появляется уровень, соответствующий логическому нулю. Такой уровень остается в течение

всего подынтервала времени независимо от того, сколько сигналов поступит на тактирующий вход  $C$ . На выходе логического элемента ЛИО будет наблюдаться логический нуль до тех пор, пока на  $1$  и  $2$  входах его не появятся одновременно уровни напряжения, соответствующие логической единице. Логическая единица на первом входе элемента ЛИО может наблюдаться в течение всего подынтервала времени, если на тактирующий вход триггера  $TP1$  за это время не поступает ни одного импульса от дискриминатора. Уровень, равный логической единице, на втором входе может появиться только после окончания подынтервала измерения и подается от генератора  $\Gamma$ . Если в течение времени подынтервала на вход устройства не поступило ни одного импульса, то по окончании интервала измерения на выходе логического элемента ЛИО сформируется импульс, который и сосчитается счетчиком  $Сч0$ . По окончании подынтервала времени триггер  $TP1$  сбрасывается в состояние, соответствующее логическому нулю импульсом генератора  $\Gamma$ .

Вход  $S$  триггера  $TP2$  соединен с первым выходом сдвигового регистра  $CP$ . Инвертирующий выход этого триггера подключен к входу  $D$  регистра  $CP$ . На всех выходах регистра будет наблюдаться уровень, соответствующий логическому нулю, до тех пор, пока на тактирующий вход  $C$  регистра не поступит импульс от дискриминатора. При поступлении импульса на вход  $C$  логическая единица, присутствующая на входе  $D$  регистра, записывается в него и появляется на первом выходе  $CP$ . При этом срабатывает триггер  $TP2$ , и на его инвертирующем выходе появляется логический нуль. Если в течение подынтервала на тактирующий вход регистра  $CP$  поступит еще импульс, то логическая единица появится на втором выходе  $CP$ . При этом на остальных выходах регистра будут наблюдаться уровни, соответствующие логическому нулю. В случае поступления за подынтервал времени  $N$  импульсов логическая единица появится на  $N$ -ом выходе регистра. Отметим, что на рисунке 1 а ограничили только четырьмя выходами регистра, однако число их можно увеличить, подключив последовательно еще нескольких регистров. Таким образом, логическая единица появляется на том выходе регистра, порядковый номер которого соответствует числу импульсов, поступивших за время этого подынтервала на его вход  $C$ . Логическая единица с выхода регистра  $CP$  подается на первый вход логического элемента «И», подсоединенного к тому выходу, где она наблюдается. По приходу импульса с генератора  $\Gamma$  на второй вход этого логического элемента логическая единица передается на выход логического элемента и сосчитывается счетчиком, подключенным к этому элементу. По окончании импульса генератора  $\Gamma$  сбрасываются в исходное состояние триггеры  $TP1, TP2$  и регистр  $CP$ .

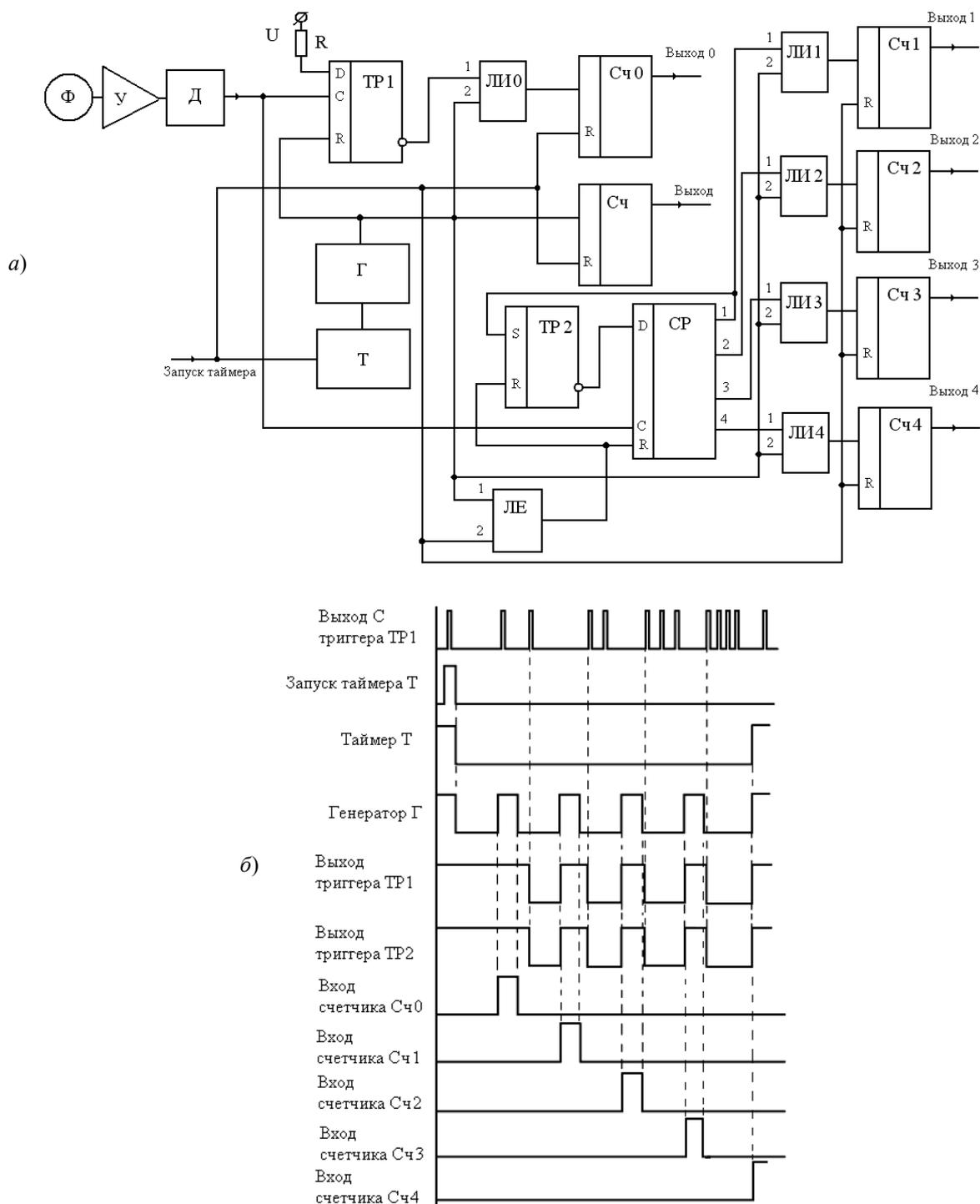


Рисунок 2.1 – Функциональная схема устройства для измерения распределения одноквантовых импульсов: а) блок-схема устройства; б) временная диаграмма функционирования устройства

Импульс сброса от генератора Г поступает на триггер TR2 и регистр СР через элемент «ИЛИ» ЛЕ.

Счетчик Сч подключен к генератору Г и подсчитывает общее число  $M$  подынтервалов за время измерения  $t$ .

Когда таймер Т остановит измерение, то счетчик Сч0 сосчитает все подынтервалы с нулевыми событиями. Счетчик Сч1 сосчитает подынтервалы, на которых регистрируется один импульс, счетчик Сч2 – подынтервалы, на которых регистрируется два импульса, и т. д. Поэтому в

каждом счетчике устройства будет содержаться информация, считывая которую в отсутствие и присутствии внешней подсветки, а также используя формулы (1.1), можно вычислить вероятности  $p_m(g)$  и  $p_{cm}(g)$ . Статистическое распределение одноквантовых импульсов рассчитывается по формуле (1.4).

### 3 Экспериментальные результаты

В качестве объекта исследования использовались счетчик фотонов на основе кремниевого лавинного фотодиода ФД-115Л. Выполнена оценка погрешности измерения, вносимая темновыми импульсами в статистического распределение одноквантовых импульсов. Для этого проводилось сравнение статистического распределения одноквантовых импульсов без темновых импульсов, полученного при помощи вышеописанного способа, со статистическим распределением с темновыми импульсами. Сравнение статистических распределений осуществлялось на основании критерия согласия Пирсона  $\chi^2$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Количество подынтервалов составляло  $M_u = 10^4$ , длительность одного подынтервала была равной  $\Delta t = 20$  мкс, чтобы число  $K = 5$ .

Внешняя подсветка осуществлялась источником света со статистикой фотонов, соответствующей распределению Пуассона, и длиной волны 630 нм. В этом случае статическое распределение одноквантовых импульсов будет также соответствовать распределению Пуассона [2].

На рисунке 3.1 представлены статистические распределения одноквантовых импульсов и смеси одноквантовых и темновых импульсов, полученных для скоростей счета одноквантовых импульсов  $n_c = 5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  и темновых импульсов  $n_m = 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ . При этом значение параметра  $\chi^2 = 98,1$  превышало величину критической точки  $\chi^2_{кр} = 9,5$  для уровня значимости 0,05. Поэтому для данного случая при определении статистического распределения одноквантовых импульсов необходимо учитывать погрешность, вносимую в него темновыми импульсами.

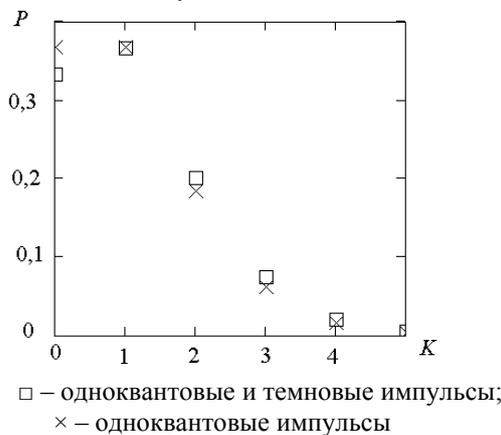
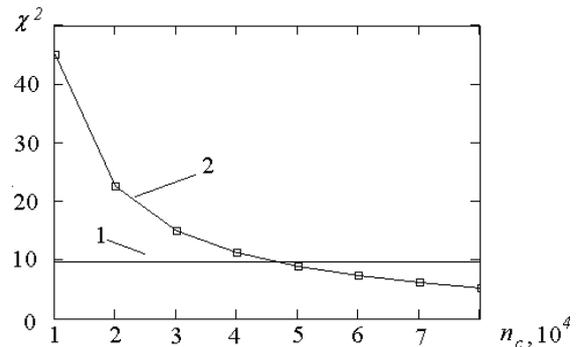


Рисунок 3.1 – Статистические распределения импульсов  
□ – одноквантовые и темновые импульсы;  
× – одноквантовые импульсы

При  $n_c = 5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  и скоростях счета темновых импульсов  $n_m < 1,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  значение  $\chi^2 < \chi^2_{кр}$  для уровня значимости 0,05. Следовательно, вкладом темновых импульсов в статистическое распределение одноквантовых импульсов можно пренебречь.

На рисунке 3.2 представлена зависимость  $\chi^2$  для различных скоростей счета одноквантовых импульсов. Измерения выполнялись при постоянном значении скорости счета темновых импульсов  $n_m = 1,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Увеличение скорости счета одноквантовых импульсов приводит к уменьшению значения  $\chi^2$  и при  $n_c > 5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  погрешностью, вносимой темновыми импульсами в данном случае, можно пренебречь.



1 – величина  $\chi^2_{кр}$  для уровня значимости 0,05;  
2 – значение  $\chi^2$

Рисунок 3.2 – Зависимость параметра  $\chi^2$  от скорости счета одноквантовых импульсов

### Заключение

Таким образом, на основании выполненных исследований можно сделать вывод, что предложенный способ позволяет учитывать погрешность, вносимую в статистическое распределение одноквантовых импульсов темновыми импульсами. Применять способ целесообразно для случаев, когда скорость счета одноквантовых импульсов не превышает скорость счета темновых импульсов более чем в 10 раз.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Демчук, М.И. Статистический одноквантовый метод в оптикофизическом эксперименте / М.И. Демчук, М.А. Иванов. – Минск: Изд. БГУ им. В.И. Ленина, 1981. – 176 с.
2. Гулаков, И.Р. Метод счета фотонов в оптико-физических измерениях / И.Р. Гулаков, С.В. Холондырев. – Минск: Университетское, 1989. – 256 с.

Поступила в редакцию 11.11.14.