**Элементарный отклик и абсолютная калибровка аналоговых детекторов**

***Осипенков А.В.1, Сафроненков Д.А.2***

*1. Студент*

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

*физический факультет, Москва, Россия*

*1. E-mail: osipenkov.av22@physics.msu.ru*

*2. E-mail: safronenkovda@my.msu.ru*

Квантовая эффективность однофотонных детекторов может быть экспериментально определена без дополнительных заранее откалиброванных оптических приборов при помощи метода, предложенного Д.Н. Клышко, идея которого заключается в использовании корреляционных свойств бифотонов, рождённых в процессе спонтанного параметрического рассеяния (СПР), для нахождения квантовой эффективности фотодетекторов, регистрирующих бифотоны [1, 2]. Другими словами, данный метод позволяет провести безэталонную калибровку однофотонных детекторов. Однако существуют детекторы, называемые аналоговыми, которые принципиально не могут работать в режиме счёта фотонов. Так, к примеру, в терагерцовой области электромагнитного спектра почти не существует однофотонных детекторов. Цель настоящей работы – обобщить метод Клышко на аналоговые фотодетекторы и осуществить безэталонную калибровку аналогового фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).

Пусть интенсивность излучения, поглощаемого детектором, постоянна и при том достаточно мала, а однофотонные отклики детектора поступают в электрическую цепь независимо друг от друга, тогда амплитуды этих откликов и их число, поступающее в цепь за время детектирования, – случайные величины, описывающиеся распределением Пуассона. В таком случае анодный ток на выходе фотодетектора будет складываться из элементарных откликов детектора (т.е. однофотонных откликов) и темнового тока (т.е. тока на выходе детектора, протекающего при отсутствии излучения на входе), причём оказывается возможным провести деконволюцию распределений на выходе фотодетектора и определить среднее число откликов за время детектирования, которое и необходимо для нахождения квантовой эффективности.

Впервые метод деконволюции распределений на выходе фотодетекторов применили в работах, посвящённых регистрации элементарных частиц с помощью сцинтилляторов [3-5]. В наших ранних работах уже были предприняты попытки обобщить метод Клышко на аналоговые детекторы, однако в обоих случаях приходилось использовать два заранее откалиброванных однофотонных детектора [6, 7]. В настоящей же работе мы впервые провели безэталонную калибровку двух ФЭУ с помощью обобщённого метода Клышко и сравнили найденную квантовую эффективность с её значением, полученным другим способом.

В эксперименте одномодовый диодный лазер с длиной волны 405 нм накачивал кристалл BiBO, в котором происходило вырожденное коллинеарное СПР I типа синхронизма. После кристалла излучение накачки урезалось фильтром, а бифотоны разделялись светоделителем по двум каналам. В одном канале излучение регистрировалось калибруемым ФЭУ H7422-20 Hamamatsu, а в другом – дополнительным (заранее неоткалиброванным) ФЭУ H7422-50 Hamamatsu. Детектор в канале, в котором стоял калибруемый ФЭУ, регистрировал большее число пространственных и частотных мод, чем детектор в другом канале. Электрические сигналы с ФЭУ поступали в интегратор, на выходе которого получались числа, пропорциональные токам детекторов, усреднённых за время строба, затем эти значения поступали через АЦП в компьютер для последующей обработки.

Была проведена аппроксимация распределений среднего тока на выходе фотодетекторов, в качестве одноэлектронного отклика была использована функция $S\_{1}\left(j\right)=bθ(j)e^{-bj}$, в итоге имеем аппроксимирующую формулу вида:

$P\left(j\right)=C\{B\left(j\right)+θ(j-j\_{0})e^{-b(j-j\_{0})}\sum\_{n=1}^{\infty }\frac{A^{n}}{n!}\frac{b^{n}(j-j\_{0})^{n-1}}{\left(n-1\right)!}\}$,

где B(j) – распределение темнового тока. В результате аппроксимации были найдены оценки для всех неизвестных параметров. Определяющее значение для квантовой эффективности играет параметр A, равный среднему числу элементарных откликов за время детектирования. Находя корреляционную функцию токов в двух каналах по формуле

$g^{(2)}=1+2(\frac{\left〈J\_{1}J\_{2}\right〉}{\left〈J\_{1}\right〉\left〈J\_{2}\right〉}-1)$,

можно определить среднее число фотонов a, падающих на фотодетектор за время детектирования. Согласно теории, величины A и a должны быть пропорциональны:

$A=ηa$,

где $η$ – квантовая эффективность аналогового ФЭУ. Было найдено, что $η=0.19\pm 0.01$.

Корректность полученного значения была проверена с использованием заранее откалиброванного однофотонного детектора: излучение лампы накаливания сначала регистрировалось однофотонным детектором с известной квантовой эффективностью, а затем калибруемым ФЭУ. Вычислялась частота попадания фотонов на апертуру детекторов. Полученные значения совпали друг с другом с учётом погрешности.

Итак, в настоящей работе предложен вариант обобщения метода Клышко калибровки фотодетекторов на детекторы, которые могут работать только в аналоговом режиме. Была найдена квантовая эффективность аналогового ФЭУ путём деконволюции статистических распределений тока на выходе детектора, а также проведён анализ корректности полученного значения квантовой эффективности.

**Литература**

1. Klyshko D.N. Use of two-photon light for absolute calibration of photoelectric detectors Sov. J. of Quantum Electronics, 10, №9, 1112-1117 (1980).

2. S.V. Polyakov, A.L.Migdall High accuracy verification of a correlated-photon-based method for determining photon-counting detection efficiency Opt. Express, 15, 1390-1407 (2007).

3. E.H. Bellamy, G.Bellettini, J.Budagov, F.Cervelli, I.Chirikov-Zorin, M.Incagli, D.Lucchesi, C.Pagliarone, S.Tokar, F.Zetti Absolute calibration and monitoring of a spectrometric channel using a photomultiplier Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 339, 468-476 (1994).

4. Chirikov-Zorin, I.Fedorko, A.Menzione, M.Pikna, I.Sykora, S.Tokar Method for precise analysis of the metal packaphotomultiplier single photoelectron spectra Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 456, 310-324 (2001).

5. R.Dossi, A.Ianni, G.Ranucci, O.Ju.Smirnov Methods for precise photoelectron counting with photomultipliers Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 451, 623-637 (2000).

6. P.A.Prudkovskii, D.A.Safronenkov, G.Kh.Kitaeva Modified Klyshko method for an analog detector calibration Opt. Lett. 47, 4842-4845 (2022).

7. P.A.Prudkovskii, D.A.Safronenkov, G.Kh.Kitaeva Klyshko Method for Analog Photodetectors and Absolute Measurement of Photon Numbers Bull. of the Russian Academy of Sciences: Physics, 88, №6, 866–873 (2024).