

Методика измерений джиттера электронно-оптических камер

М. В. Канзюба, В. Б. Лебедев

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Российская Федерация, e-mail: mkanzyuba@vniiofi.ru

Рассмотрено явление джиттера применительно к электронно-оптическим камерам, применяемым при исследовании быстротекущих процессов. Предложена методика измерений джиттера электронно-оптических камер, работающих в режиме линейной развертки исследуемого импульсного оптического сигнала. Описана экспериментальная установка, реализующая эту методику измерений. Данная установка используется во ВНИИОФИ для контроля джиттера выпускаемых электронно-оптических камер на соответствие спецификации либо требованиям технических заданий заказчиков.

Ключевые слова: джиттер, измерение, электронно-оптическая камера.

Введение. Электронно-оптические камеры (ЭОК), работающие в режиме линейной развертки исследуемого импульсного оптического сигнала, незаменимы при исследованиях разнообразных быстротекущих процессов, таких как горение, взрыв, ударные и детонационные волны, разрушение материалов и конструкций, баллистика, естественные и искусственные электрические разряды, импульсные излучения и их взаимодействие с веществом, динамика плазмы, фазовые переходы, химические реакции [1–4].

В общем случае джиттером, или фазовым дрожанием, называется явление фазовой модуляции принимаемого сигнала (как аналогового, так и цифрового) [5]. На практике джиттер представляет собой нестабильность импульсного периодического сигнала в виде изменения временного интервала (разброса) между заданным началом периода и последовательными реализациями сигнала в каждом периоде.

При исследовании повторяющихся оптических процессов с помощью ЭОК, работающих в режиме линейной развертки, джиттер проявляется в виде разброса наблюдаемого положения оптического импульсного сигнала на развертке при синхронном с сигналом запуске ЭОК. Основная причина разброса заключается в нестабильности времени срабатывания генератора высоковольтных импульсов развертки. Помимо собственного джиттера ЭОК вклад в наблюдаемый на её экране джиттер может вносить джиттер запускающего ЭОК сигнала относительно регистрируемого процесса. Поэтому для корректного измерения собственного джиттера ЭОК при её запуске необходимо исключить джиттер запускающего сигнала.

Количественно джиттер можно характеризовать различным образом. Полный джиттер (англ. peak-to-peak jitter) определяется как максимальный разброс во времени положений импульса на развертке, т. е. разность максимальной

и минимальной задержек относительно начала развертки. Однако по мере накопления статистики полный джиттер будет монотонно возрастать с увеличением размера выборки, и к тому же на него будут влиять большие случайные флуктуации (выбросы). Поэтому предпочтительнее в качестве характеристики джиттера использовать параметр статистики положений импульса, определяющий ширину распределения и не зависящий от размера выборки. В типичном практическом случае, когда распределение положений импульса является нормальным или близко к нему, джиттер удобно характеризовать среднеквадратичным значением. Таким образом, среднеквадратичное значение джиттера – это параметр ширины нормального распределения, несмещённой оценкой которого является среднее квадратическое отклонение (СКО) положения импульса.

При работе ЭОК в режиме накопления повторяющихся сигналов значение джиттера непосредственно определяет погрешность измерения длительности этих сигналов. Поэтому джиттер необходимо измерять на всех диапазонах развертки ЭОК.

Значение джиттера, отнесённое к длительности развертки (относительный джиттер), характеризует качество ЭОК. Чем меньше относительный джиттер, тем выше качество ЭОК. Наибольшего значения относительный джиттер достигает на самой быстрой развертке ЭОК. Поэтому, как правило, в технических заданиях на ЭОК заказчики выставляют требования именно к джиттеру на самой быстрой развертке.

Экспериментальная установка. Разработанная во ВНИИОФИ экспериментальная установка, предназначенная для измерения джиттера ЭОК, реализует прямой метод измерения. При измерении джиттера ЭОК многократно регистрируется положение одиночного короткого лазерного импульса на развертке. Запуск ЭОК при этом осуществляется по электрическому сигналу коаксиального фотоэлемента

ФЭК [6, 7] производства ВНИИОФИ. С помощью светоделительной пластинки на фотоэлемент отводится часть излучения регистрируемого лазерного импульса. Чтобы изображение импульса попадало на развёртку, необходимо синхронизировать время прихода лазерного импульса на фотокатод ЭОК с моментом её запуска. Для синхронизации используются оптическая линия задержки, которая задерживает падающий на фотокатод ЭОК импульс, и линия задержки запускающего электрического сигнала фотоэлемента.

На рис. 1 представлена функциональная схема экспериментальной установки. Фемтосекундный лазер 6 генерирует последовательность импульсов длительностью порядка 100 фс на длине волны 1050 нм с частотой повторения 70 МГц. Электрооптический затвор 5 выделяет из этой последовательности одиночный импульс. Генератор второй гармоники 4 преобразует частоту лазерного излучения в видимый диапазон. В результате энергия лазерного импульса на длине волны 525 нм составляет около 30 нДж. Светоделительная пластинка 3 отводит часть излучения на фотоэлемент 2. Электрический импульс фотоэлемента служит для запуска ЭОК, которой свойственна определённая задержка срабатывания («мёртвое время»). Основная часть излучения проходит оптическую линию задержки 12, состоящую из одного сферического и двух плоских зеркал. Чтобы лазерный импульс попал на развёртку, регулируют задержку. Для её регулировки используют линию задержки

запускающего электрического сигнала фотоэлемента в виде отрезка радиочастотного кабеля 13 регулируемой длины. С целью предотвращения чрезмерной облучённости фотокатода ЭОК, приводящей к искажению регистрируемых сигналов, применяют нейтральные светофильтры 11. Расширитель пучка 10 служит для заполнения излучением всей длины щели ЭОК. Чтобы облучённость щели после расширителя не уменьшалась, за расширителем устанавливают цилиндрическую линзу 9, фокусирующую излучение на щель ЭОК. Изображения, зарегистрированные ЭОК, фиксируются встроенной в ЭОК цифровой телекамерой. Изображения передаются в компьютер 7 для отображения на мониторе, записи на диск и последующего анализа.

Методика измерений. Джиттер измеряют следующим образом. Настраивают частоту повторения выделенных лазерных импульсов, чтобы она не превышала максимально допустимую частоту запуска ЭОК. Запускают ЭОК в режиме циклической съёмки на самой медленной развёртке. Подбирают длину кабеля между фотокатодом и ЭОК, чтобы на мониторе в середине развёртки наблюдалось изображение лазерного импульса в виде узкой вертикальной полосы. Данная полоса представляет собой временную аппаратную функцию ЭОК на этом диапазоне развёртки. Используя программное обеспечение ЭОК, записывают в файлы не менее 100 последовательных изображений импульса. Повторяют указанную процедуру на следующих более быстрых диапазонах развёртки. Длительность самой быстрой развёртки ЭОК с пикосекундным временным разрешением составляет доли наносекунды. Плавную регулировку момента срабатывания ЭОК на этой развёртке осуществляют путём небольших плавных перемещений фотоэлемента в одну или другую сторону вдоль его оптической оси – навстречу пучку или в обратную сторону в зависимости от требуемого уменьшения или увеличения задержки запускающего сигнала.

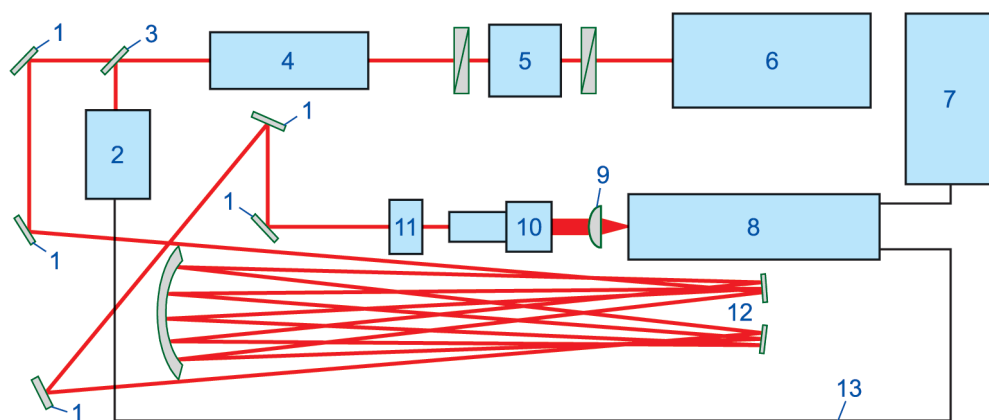


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения джиттера электронно-оптической камеры:

1 – зеркала; 2 – фотоэлемент; 3 – светоделительная пластинка; 4 – генератор второй гармоники; 5 – электрооптический затвор; 6 – фемтосекундный лазер; 7 – компьютер; 8 – электронно-оптическая камера; 9 – цилиндрическая линза; 10 – расширитель пучка; 11 – нейтральные светофильтры; 12 – оптическая линия задержки; 13 – линия задержки запускающего электрического сигнала

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup for jitter measurement of an image converter streak camera:

1 – mirrors; 2 – phototube; 3 – beam splitter; 4 – second harmonic generator; 5 – electro-optical shutter; 6 – femtosecond laser; 7 – computer; 8 – streak camera; 9 – cylindrical lens; 10 – beam expander; 11 – neutral light filters; 12 – optical delay line; 13 – trigger signal delay line

запускающего электрического сигнала фотоэлемента в виде отрезка радиочастотного кабеля 13 регулируемой длины. С целью предотвращения чрезмерной облучённости фотокатода ЭОК, приводящей к искажению регистрируемых сигналов, применяют нейтральные светофильтры 11. Расширитель пучка 10 служит для заполнения излучением всей длины щели ЭОК. Чтобы облучённость щели после расширителя не уменьшалась, за расширителем устанавливают цилиндрическую линзу 9, фокусирующую излучение на щель ЭОК. Изображения, зарегистрированные ЭОК, фиксируются встроенной в ЭОК цифровой телекамерой. Изображения передаются в компьютер 7 для отображения на мониторе, записи на диск и последующего анализа.

Обработать записанные изображения можно как вручную, так и с использованием программных средств автоматизации анализа изображений. На каждом изображении определяют координату импульса на развёртке t_p , т. е. интервал времени от начала развёртки до момента времени, когда интенсивность сигнала максимальна. Связь между координатой x на развёртке, выраженной в пикселях изображения, и временным

интервалом t , который отсчитывается от начала развёртки, в общем случае выражается градуировочной зависимостью

$$t = \int_0^x k(x) dx,$$

где $k(x)$ – коэффициент развёртки, зависящий от координаты.

В случае, когда неоднородность коэффициента развёртки пренебрежимо мала, либо если программное обеспечение ЭОК осуществляет программную коррекцию неоднородности $k(x)$, связь между значением координаты импульса на развёртке в единицах времени (t_i) и в пикселах изображения (x_i) определяется формулой

$$t_i = k x_i,$$

где k – значение коэффициента развёртки, приведённое в эксплуатационной документации ЭОК либо установленное экспериментально [8].

В программное обеспечение ЭОК может также входить функция автоматического преобразования координат из пикселей изображения в единицы времени в процессе записи изображения в файл.

Далее рассчитывают среднее значение t_{cp} и СКО σ_t положения импульса по формулам соответственно

$$t_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i;$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - t_{cp})^2},$$

где $i = 1, \dots, N$, N – количество обработанных изображений.

Результатом измерений джиттера ЭОК является среднеквадратичное значение (СКЗ) джиттера $J_{СКЗ}$, в соответствии с приведённым выше определением равно СКО:

$$J_{СКЗ} = \sigma_t.$$

Стандартную неопределённость по типу А результата измерений джиттера ЭОК вычисляют по формуле, выведенной для стандартной неопределённости оценки параметра ширины нормального распределения по конечной выборке [9]:

$$u_A(J_{СКЗ}) = \frac{1}{\sqrt{2(N-1)}} \cdot 100.$$

Стандартную неопределённость по типу В результата измерений джиттера ЭОК рассчитывают с учётом стандартной неопределённости коэффициента развёртки $u(k)$, приведённой в эксплуатационной документации ЭОК либо установленной экспериментально при измерении коэффициента развёртки:

$$u_B(J_{СКЗ}) = u(k).$$

Суммарную стандартную неопределённость результата измерений джиттера ЭОК рассчитывают по формуле

$$u_c(J_{СКЗ}) = \sqrt{u_A^2(J_{СКЗ}) + u_B^2(J_{СКЗ})}.$$

Расширенную неопределённость результата измерений джиттера ЭОК для коэффициента охвата, равного двум, вычисляют как

$$U(J_{СКЗ}) = 2u_c(J_{СКЗ}).$$

Измерение джиттера ЭОК КВФШ65.10.000. Данная камера является прототипом выпускаемых ВНИИОФИ серийных ЭОК К016 и используется как эталонное средство измерений длительности лазерного импульса в составе установки КВФШ65.00.000. Установка аттестована в качестве государственного вторичного эталона длительности импульса лазерного излучения (регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений 2.1.ZZA.0101.2017).

На самой быстрой развёртке ЭОК (0,1 нс/см) длительностью 150 пс записали 1000 изображений одиночного фемтосекундного лазерного импульса. Гистограмма распределения количества изображений по координате импульса $N(i)$ приведена на рис. 2. Распределение имеет один максимум и по форме похоже на нормальное (показано кривой

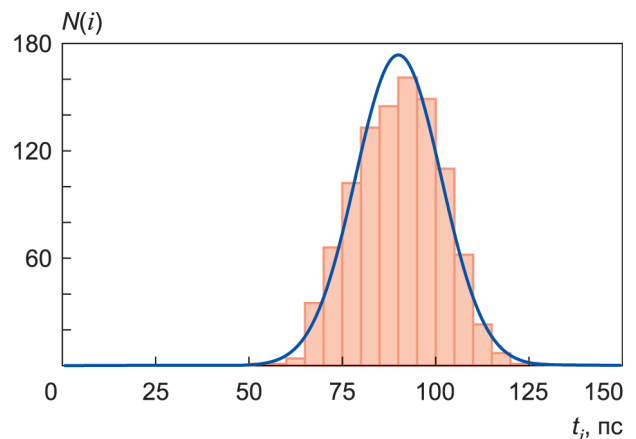


Рис. 2. Гистограмма распределения положения одиночного фемтосекундного лазерного импульса на развёртке электронно-оптической камеры КВФШ65.10.000; кривая – график нормального распределения с теми же значениями среднего и среднего квадратического отклонения

Fig. 2. Histogram of the distribution of the single femtosecond laser pulse position on the sweep of the KVFSh65.10.000 streak camera; plotted by a solid line is the graph of the normal distribution with the same values of mean and root-mean-square deviation

линией на рис. 2), что подтверждает правомерность оценки джиттера его среднеквадратичным значением.

Результат измерений джиттера ЭОК КВФШ65.10.000 составил $J_{СКЗ} = 11,5$ пс, что в 13 раз меньше длительности самой быстрой развёртки данной ЭОК (150 пс). Такой джиттер позволяет применять ЭОК K016 как средство измерений временных параметров быстропротекающих процессов, сопровождающихся оптическим излучением, в том числе и периодически повторяющихся процессов. Рассчитанные неопределённости составили: $u_A(J_{СКЗ}) = 2,24\%$; $u_B(J_{СКЗ}) = 2,67\%$; $u_C(J_{СКЗ}) = 3,5\%$; $U(J_{СКЗ}) = 7\%$.

Существуют задачи, например, измерение длительности импульсов малой интенсивности в режиме накопления сигнала от множества повторяющихся импульсов, при решении которых требуется нивелировать джиттер. Тогда для получения корректного результата измерений необходимо использовать программные либо программно-аппаратные средства компенсации джиттера, реализованные в конструкции и программном обеспечении ЭОК [10].

Заключение. Разработанная методика измерений джиттера пригодна для электронно-оптических камер, работающих в режиме линейной развёртки исследуемого импульсного оптического сигнала. Созданная экспериментальная установка, реализующая предложенную методику измерений, применяется во ВНИИОФИ для контроля джиттера ЭОК. В рамках методики измерен джиттер электронно-оптической камеры – прототипа серийных ЭОК K016, выпускаемых ВНИИОФИ. ЭОК K016 предназначены для измерения временных характеристик оптических импульсов и являются средствами измерений утверждённого типа (регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений 71686-18) [11]. Достигнутой точности измерений джиттера по предложенной методике достаточно для оценки соответствия значения джиттера выпускаемых ЭОК требованиям технических заданий заказчиков.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП высокоточных измерительных технологий в области фотоники (скр.vniiofi.ru), созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» и поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 05.595.21.0005 (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005).

Список литературы

1. Лебедев В. Б., Фельдман Г. Г., Карпов М. А., Федоров А. В., Меньших А. В., Назаров Д. В., Финюшин С. А., Давыдов В. А. Применение камеры K008 в диагностике ударных и детонационных волн // Измерительная техника. 2007. № 5. С. 46–49.
2. Shcherbakov Y. V., Lebedev V. B., Rakov V. A., Feldman G. G., Gorin B. N., Syssoev V. S., Karpov M. A., *Proceedings of SPIE*, 2007, vol. 6279, 62795D. <https://doi.org/10.1117/12.725386>
3. Lebedev V. B., Feldman G. G., Savel'ev A. B., Bugar I., Chorvat Jr. D., *Proceedings of SPIE*, 2005, vol. 5580, pp. 898–904. <https://doi.org/10.1117/12.597451>

4. Ананьев С. С., Данько С. А., Калинин Ю. Г. Определение параметров горячей компоненты плазмы при сжатии многопроволочных сборок по времяразрешённым рентгеновским спектрам H- и He- подобных ионов // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 2. С. 111–124. <https://doi.org/10.7868/S0367292114020024>
5. Бакланов И. Г. Методы измерений в системах связи. М.: Эко-Трендз, 1999. 204 с.
6. Андреева Л. И., Степанов Б. М. Фотоэлементы для измерения мощных импульсов света // Измерительная техника. 1965. № 8. С. 38–43.
7. Андреева Л. И., Кайдалов С. А., Семичастнова З. М., Степанов Б. М. Фотоэлектронные приборы для энергетической фотометрии. – В сб.: Импульсная фотометрия. Вып. 6. Л.: Машиностроение, 1979. С. 204.
8. Kanzyuba M. V., Berlizov A. B., Krutikov V. N., Lebedev V. B., Feldman G. G., *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10328, 103280G. <https://doi.org/10.1117/12.2269298>
9. Ahn S., Fessler J. E. Standard errors of mean, variance, and standard deviation estimators. Technical report. The University of Michigan, July 24, 2003. URL: <https://web.eecs.umich.edu/~fessler/papers/files/tr/stderr.pdf> (дата обращения: 23.06.2020).
10. Агеева Н. Н., Броневой И. Л., Забегаев Д. Н., Кривоносов А. Н. Математический алгоритм устранения джиттера при измерении с помощью электронно-оптических камер усреднённой хронограммы пикосекундного импульса света // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/13/text.pdf> (дата обращения: 23.06.2020). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.13>
11. Канзюба М. В. Метрологическое обеспечение измерений временных характеристик импульсного лазерного излучения в пикосекундном диапазоне // Фотоника. 2019. № 7. С. 670–675. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FROS.2019.13.7.670.675>

References

1. Lebedev V. B., Fel'dman G. G., Karpov M. A., Fedorov A. V., Men'shikh A. V., Nazarov D. V., Finyushin S. A., Davydov V. A., *Measurement Techniques*, 2007, vol. 50, no. 5, pp. 524–528. <https://doi.org/10.1007/s11018-007-0104-5>
2. Shcherbakov Y. V., Lebedev V. B., Rakov V. A., Feldman G. G., Gorin B. N., Syssoev V. S., Karpov M. A., *Proceedings of SPIE*, 2007, vol. 6279, 62795D. <https://doi.org/10.1117/12.725386>
3. Lebedev V. B., Feldman G. G., Savel'ev A. B., Bugar I., Chorvat Jr. D., *Proceedings of SPIE*, 2005, vol. 5580, pp. 898–904. <https://doi.org/10.1117/12.597451>
4. Anan'ev S. S., Dan'ko S. A., Kalinin Y. G., *Plasma Physics Reports*, 2014, vol. 40, no. 2, pp. 89–100. <https://doi.org/10.1134/S1063780X14020020>
5. Baklanov I. G., *Metody izmereniy v sistemakh svyazi*, Moscow, Eko-Trendz Publ., 1999, 204 p. (in Russian).
6. Andreeva L. I., Stepanov B. M., *Measurement Techniques*, 1965, vol. 8, pp. 748–755. <https://doi.org/10.1007/BF00985638>

7. Andreeva L. I., Kaidalov S. A., Semichastnova Z. M., Stepanov B. M., in collection: *Impulsnaya Fotometriya*, no. 6, Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979, p. 204 (in Russian).
 8. Kanzyuba M. V., Berlizov A. B., Krutikov V. N., Lebedev V. B., Feldman G. G., *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10328, 103280G. <https://doi.org/10.1117/12.2269298>
 9. Ahn S., Fessler J. E., Standard errors of mean, variance, and standard deviation estimators. Technical report. The University of Michigan, July 24, 2003, available at: <https://web.eecs.umich.edu/~fessler/papers/files/tr/stderr.pdf> (accessed: 23.06.2020).
 10. Ageeva N. N., Bronevoi I. L., Zabegaev D. N., Krivonozov A. N., *Journal of Radio Electronics*, 2018, no. 11, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/13/text.pdf> (accessed: 23.06.2020, in Russian). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.13>
 11. Kanzyuba M. V., *Photonics Russia*, 2019, vol. 13, no. 7, pp. 670–675 (in Russian). <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FROS.2019.13.7.670.675>
- Дата поступления: 02.07.2020.
Дата принятия: 02.08.2020.

Jitter measurement technique for image converter streak cameras

Mikhail V. Kanzyuba, Vitaly B. Lebedev

All-Russia Research Institute of Optophysical Measurements (VNIIOFI), Moscow, Russia

The phenomenon of jitter is considered for image converter streak cameras used in fast process research. Jitter measurement technique is proposed for image converter streak cameras working in linear sweep mode of the pulsed optical signal in study. The experimental setup implementing this measurement technique is described. This setup is used in VNIIOFI for jitter checking of manufactured image converter streak cameras for compliance with specification or customer requirements.

Key words: jitter, measurement, streak camera.