

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ УСТРАНЕНИЯ ДЖИТТЕРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ КАМЕР УСРЕДНЕННОЙ ХРОНОГРАММЫ ПИКОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА СВЕТА

Н. Н. Агеева, И. Л. Броневой, Д. Н. Забегаев, А. Н. Кривонос

Институт радиотехники и электроники им В.А.Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2018 г.

Аннотация. При прямых измерениях временной зависимости интенсивности светового импульса пикосекундной длительности с помощью электронно-оптической камеры возникает проблема случайных отклонений положений фронтов измеряемых импульсов по оси времени, называемых джиттером. В статье представлен математический алгоритм, решающий эту проблему. Действие алгоритма основано на совмещении изображений огибающих световых импульсов (хронограмм) по найденной средней линии, делящей площадь под огибающей импульса на две равные части. Алгоритм использовался при проведении автоматизированных измерений усредненных хронограмм пикосекундных импульсов света, и показал высокий результат, лишенный недостатков при простом суммировании.

Ключевые слова: джиттер, электронно-оптическая камера, измерения с временным разрешением, пикосекундный импульс света, хронограмма.

Abstract. During direct measurements of the time dependence of picosecond light pulse intensity via streak camera the problem of measured pulses leading edges inadvertent deviations on time axis arises, which are called jitter. The article presents a mathematical algorithm that solves this problem. The action of the algorithm is based on the convergence of the light pulses images envelope curves (chronograms) in average line, which divides the square under the curve into two equal parts. The algorithm was used in computer-aided measurements of picosecond light pulses

average chronograms. It demonstrated a fine result free from simple summation weaknesses.

Key words: jitter, streak camera, time-resolved measurements, picosecond light pulse, chronogram.

Введение

При прямых измерениях огибающей светового импульса сверхкороткой (пико- и фемтосекундной) длительности с помощью электронно-оптических камер (ЭОК) возникает проблема случайных отклонений положений фронтов измеряемых импульсов по оси времени. Такие отклонения, называемые джиттером, связаны с нестабильностью запуска линейной развертки ЭОК. Основные причины последнего в нестабильности амплитуды и формы импульса, запускающего развертку ЭОК; нестабильности задержки запускающего импульса при его прохождении через элементы цифровых микросхем; задержки импульса и его затухания при прохождении по кабелям и т.д. Джиттер оказывает существенное негативное влияние на работу не только ЭОК, но и многих других современных высокоскоростных цифровых устройств обработки и передачи сигналов [1]. Проявляется в виде нежелательных фазовых или частотных отклонений передаваемого сигнала, что приводит к искажению передаваемой информации. Таким образом, устранение джиттера – одна из основных задач, возникающих при проектировании цифровой электроники.

Существуют различные устройства, предназначенные для борьбы с эффектом джиттера на аппаратном уровне [2]. В их основе лежит либо применение буферной памяти, либо систем фазовой автоподстройки частоты, см., например, [3]. Однако подобные способы решения требуют дорогостоящей аппаратной части высокоскоростных цифровых устройств. В данной работе предложен способ устранения джиттера при измерениях огибающей светового импульса пикосекундной длительности с помощью ЭОК, основанный на математической обработке полученных результатов.

Эксперимент

С проблемой устранения джиттера мы столкнулись при измерении огибающих световых импульсов накачки и стимулированного излучения пикосекундной длительности, представленных в работе [4]. Эти измерения проводились на лазерном пикосекундном спектрофотохронметрическом комплексе с автоматизированной системой сбора и обработки измеряемых величин, см. рис.1. Комплекс состоит из: 1) задающего лазера с диодной накачкой PL PDP1-300; 2) системы усиления сначала генерируемого лазером светового импульса, а затем двух импульсов, на которые делится усиленный исходный импульс; 3) удвоителей частоты усиленных импульсов, последние затем накачивают два параметрических генератора света (ПГС); 4) вышеуказанных ПГС (с температурной перестройкой длины волны), служив-

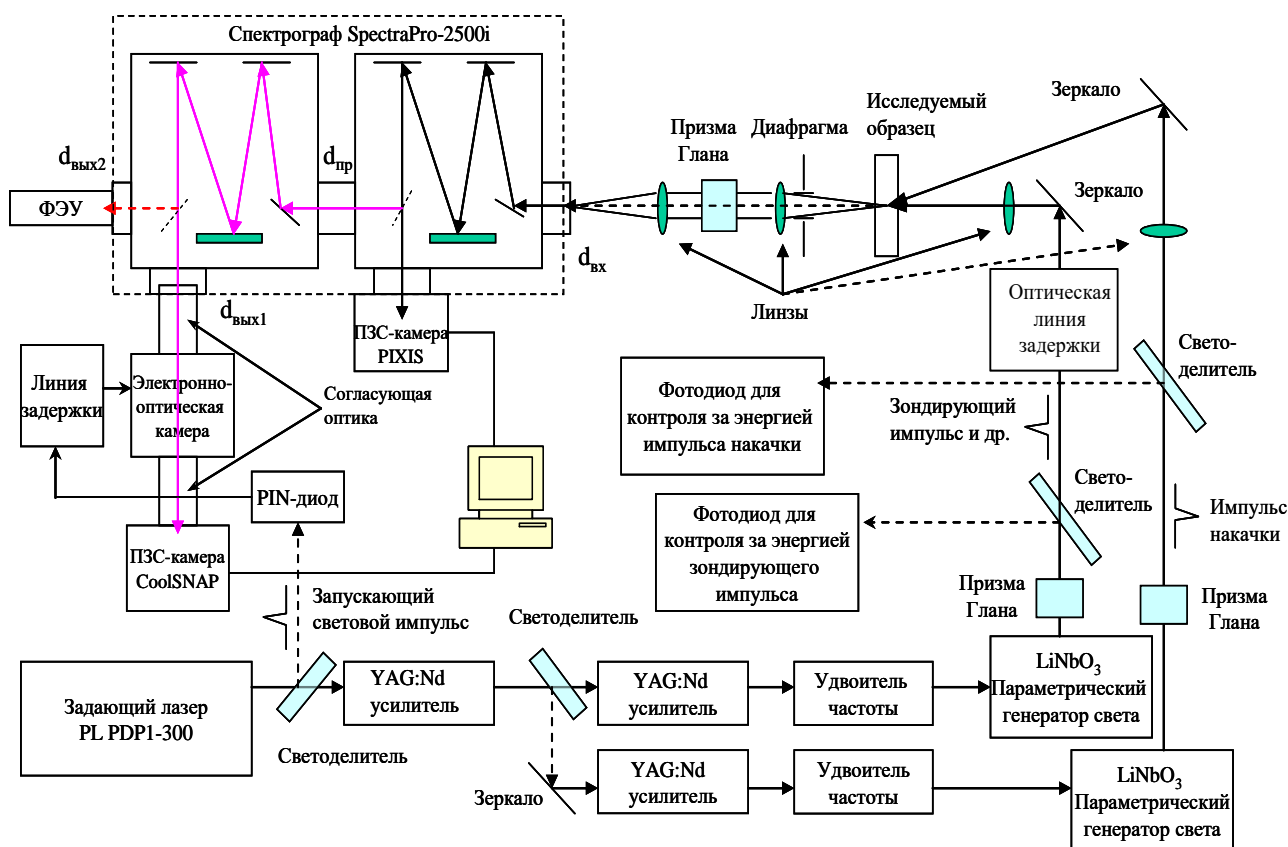


Рис. 1 Схема лазерного пикосекундного спектрофотохронметрического комплекса.

ших для генерации накачивающего и зондирующего импульсов (длительностью (FWHM) $T_p \approx 10$ пс и с линейной поляризацией света); 5) спектрофотохронметрической системы. Наиболее важными компонентами

последней являлись: (а) двойной спектрограф SpectraPro-2500i, используемый как для спектральных измерений, так и (в режиме вычитания дисперсии) в качестве полосового фильтра длин волн, не искажающего длительность импульса излучения; (б) установленная на выходе второй ступени спектрографа пикосекундная электронно-оптическая камера PS-1/S1, где зависимость интенсивности излучения от времени преобразовывалась в пространственную зависимость интенсивности [5, 6] (в) две ПЗС-камеры “PIXIS” и “CoolSNAP:HQ2”, предназначенные для регистрации: одна (на выходе первой ступени спектрографа) – спектра световых импульсов, вторая (на выходе ЭОК) – огибающей световых импульсов (ПЗС – прибор с зарядовой связью). Полученное в итоге последнее изображение огибающей называется хронограммой.

Запуск ЭОК осуществлялся с помощью светового импульса. Для этого часть излучения задающего лазера отводилась на кремниевый $p-i-n$ фотодиод. Сгенерированный световым импульсом электрический импульс с фотодиода, пройдя изменяемую ступенчато кабельную линию задержки, подавался на ЭОК для ее запуска. Нестабильность запуска линейной развертки ЭОК (джиттер) составлял около ± 5 пс.

Стандартная программа WinSpec32, управляющая камерой CoolSNAP:HQ2, позволяет регистрировать хронограммы в двух режимах: а) “однократном”, когда на одном снимке присутствует одна хронограмма светового импульса; б) в режиме “суммирования”, когда производится суммирование заданного экспериментатором количества хронограмм и “усредненная” хронограмма выводится на один снимок. Пример измеренных хронограмм одиночного светового импульса накачки, полученных в однократном режиме, приведен на рис. 2. На хронограммах присутствуют шумовые импульсы, сильно искажающие вид хронограмм. Причинами этого нестационарного шума являются: неравномерность фотоэмиссии электронов и их рекомбинация в фотокатоде ЭОК, разброс коэффициента умножения в микроканальном усилителе и др. Для оценки погрешности отображения

одионочной хронограммой $I_p = f(t)$ истинного изменения интенсивности света со временем $I = f(t)$ в измеренном импульсе на рис.2а представлены четыре

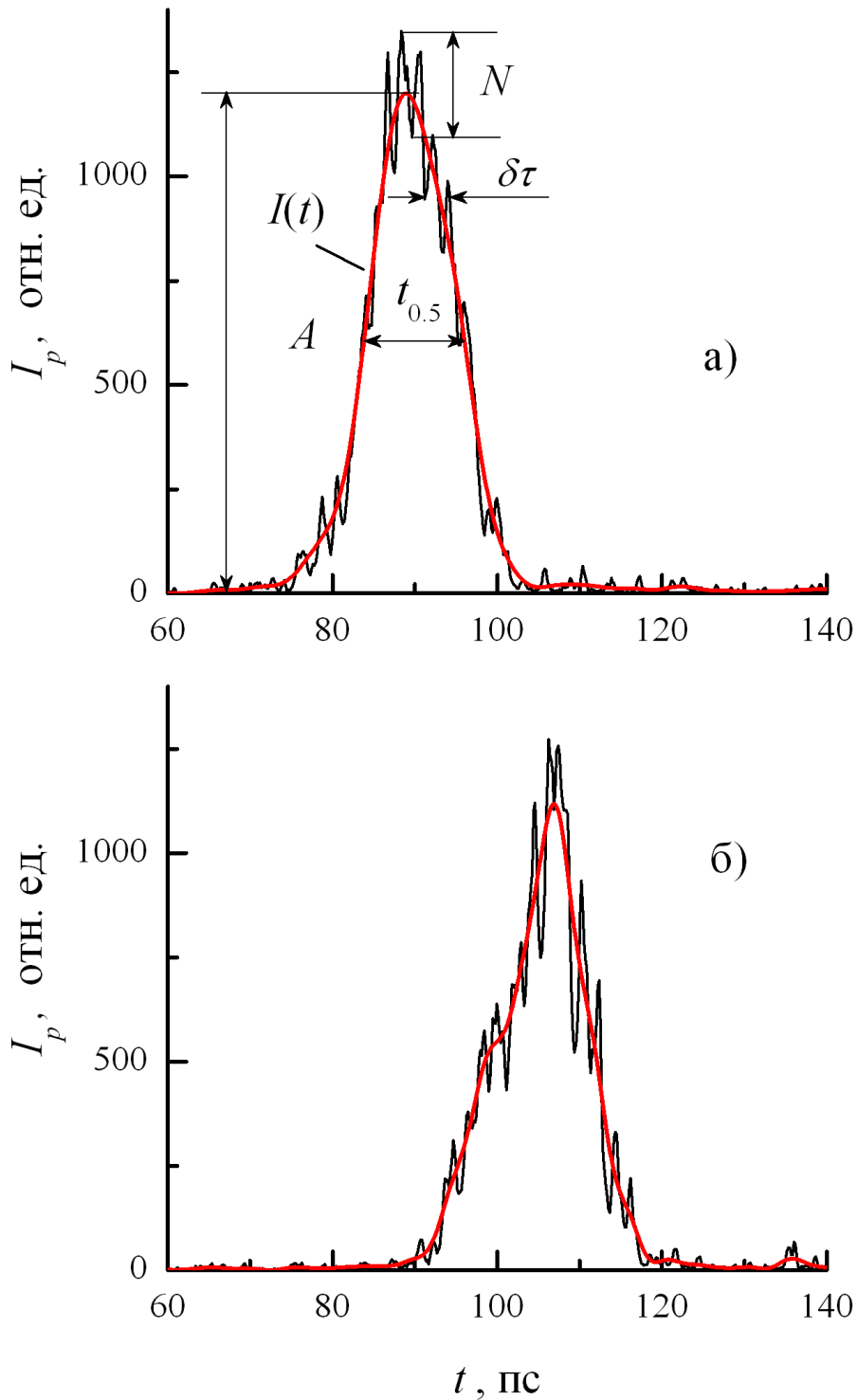


Рис. 2. Хронограммы $I_p = f(t)$ одиночных световых импульсов, измеренные с помощью лазерного пикосекундного спектрофотохронметрического комплекса. $I = f(t)$ – сглаженная хронограмма. Описание параметров $A, N, \delta\tau, t_{0.5}$ дано в тексте.

характеристических параметра A , N , $\delta\tau$, $t_{0.5}$ [7]. Здесь A – это амплитуда сглаженной хронограммы $I = f(t)$ одиночного импульса (сглаживание проводилось по алгоритму быстрого преобразования Фурье с отсечением высокочастотных колебаний (FFT filter)). Сглаженная $I = f(t)$ и экспериментальная $I_p = f(t)$ зависимости имеют одинаковую интегральную площадь под кривой. N – это максимальный скачок интенсивности I_p на хронограмме. При этом отношение A/N характеризует максимальную (для данной хронограммы) относительную погрешность измерения интенсивности света в фиксированный момент времени. Параметр A/N аналогичен широко используемому отношению “сигнал/шум”. Третий параметр $\delta\tau$ – это максимальная абсолютная погрешность определения момента времени, в который интенсивность света имеет фиксированное значение. Численно $\delta\tau$ выбирается из хронограммы как максимальная сумма ширин расположенных рядом шумовых пиков, пересекаемых горизонтальной линией $I_p = \text{const}$, параллельной оси абсцисс. Этот параметр существенен для оценки погрешности измерения временного хода импульса по фронту и спаду хронограммы, например, в области $I_p = 0.2A \div 0.8A$. Параметр $t_{0.5}$ – длительность импульса (FWHM) определенная по сглаженной хронограмме $I = f(t)$. Полученные значения приведенных выше параметров для хронограмм одиночного импульса света, представленных на рис.2 даны в таблице 1.

Таблица 1.

| Режим измерений | A/N | $\delta\tau$, пс | $t_{0.5}$, пс |
|---------------------------------|-------|-------------------|----------------|
| однократный | 4 | 3.0 | 12.3 |
| однократный | 2 | 3.7 | 11.7 |
| Режим суммирования | 16 | 1.0 | 24.6 |
| Измерения с вычитанием джиттера | 210 | 0.2 | 13.7 |

Изрезанность хронограмм пиками импульсных шумов затрудняет определение формы и основных характеристик измеряемого импульса. Как видим из таблицы 1 величина параметра сигнал/шум A/N мала, что приводит к высокой неопределенности амплитуды хронограммы и, соответственно, длительности $t_{0.5}$. Величина $\delta\tau$ составляет 3 – 4 пс, из-за чего возникает большая неопределенность в форме огибающей измеряемого светового импульса.

Для усреднения шумовых импульсов, присутствующих на хронограммах, измеренных в однократном режиме, является естественным измерение хронограмм пикосекундных импульсов в режиме суммирования. Результат такого эксперимента представлен на рис. 3.

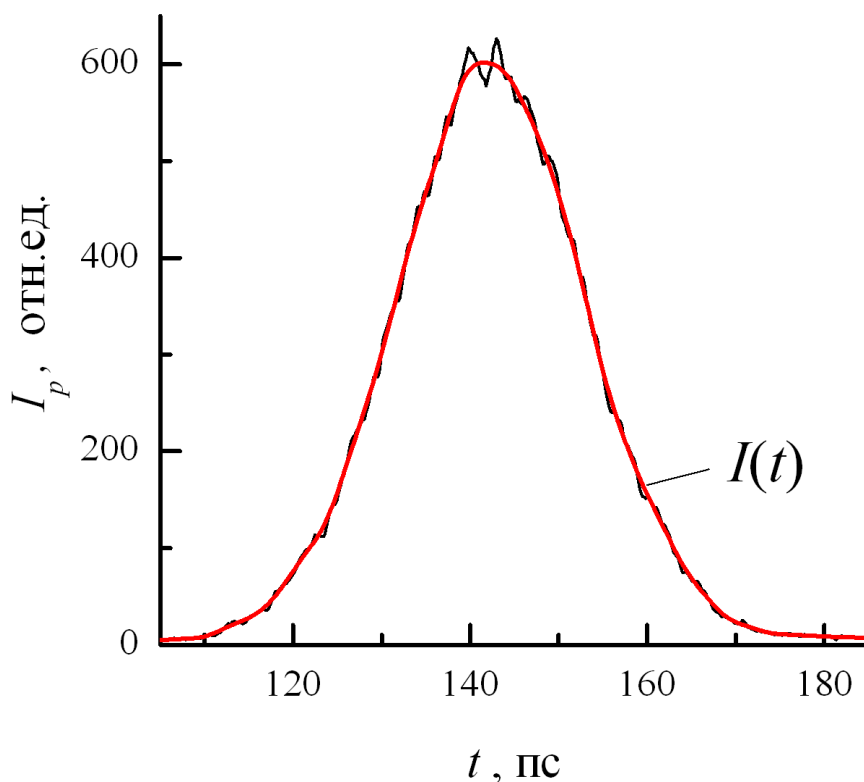


Рис. 3. Хронограмма $I_p = f(t)$ получена в результате суммирования 160 одиночных хронограмм импульса накачки.

Как видно из рис. 3 хронограмма $I_p = f(t)$ гораздо менее изрезана шумовыми выбросами и параметр A/N в 4 раза больше, чем при измерениях в однократном режиме (см. таблицу 1). Однако длительность импульса $t_{0.5}$ в два раза выше измеренной в однократном режиме.

Уширение хронограммы при измерениях в режиме суммирования связано с джиттером, о причинах которого сказано выше. Как видно из рис. 2, положение фронтов хронограмм а) и б) не совпадает. Это приводит к увеличению длительности итоговой хронограммы и к искажению всех параметров хронограммы при суммировании. Такой процесс искажения (уширения) формы сверхкороткого светового импульса не несет в себе физического смысла и, следовательно, простое суммирование также не подходит для определения истинной формы хронограммы светового импульса. Для проведения корректной обработки измеренных хронограмм возникает необходимость устранения эффекта джиттера. С этой целью был разработан способ устранения джиттера, основанный на математической обработке измеренных хронограмм.

Алгоритм устранения джиттера

Суть разработанного алгоритма заключается в совмещении хронограмм импульсов по вертикальной линии, условно делящей площадь под графиком каждого импульса на некотором заданном диапазоне на две равные части. Таким образом, задача сводится к нахождению положения этой средней линии на каждой из измеренных хронограмм.

Работа алгоритма демонстрируется на рис. 4. Перед началом измерений экспериментатору необходимо выбрать значения a и b , такие, чтобы диапазон $2a$ примерно соответствовал ширине измеряемого импульса по основанию, а диапазон $2b$ – ширине области, представляющий интерес для исследования и включающий в себя измеряемый импульс. Во время измерений программа, осуществляющая заданный алгоритм обработки экспериментальных данных, находит точку на оси абсцисс, соответствующую значению максимума хронограммы (точка M). В диапазоне $(M - a; M + a)$ рассчитывается площадь под графиком хронограммы. Далее на оси абсцисс определяется значение положения вертикальной линии, делящей эту площадь на две равные части (точка C). Вырезается диапазон $(C - b; C + b)$. Часть графика, ограниченная этим диапазоном, участвует в дальнейшей обработке данных, в том числе при суммировании хронограмм для нахождения их усредненного значения.

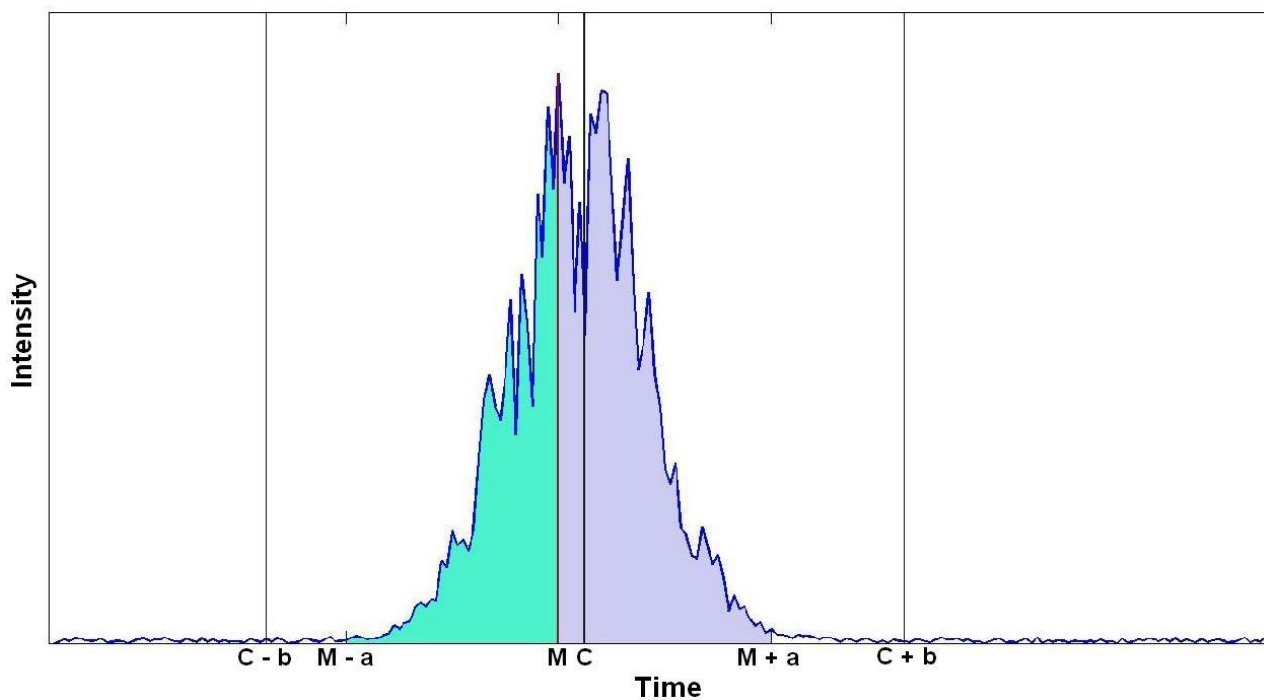


Рис. 4. Демонстрация работы алгоритма устранения джиттера

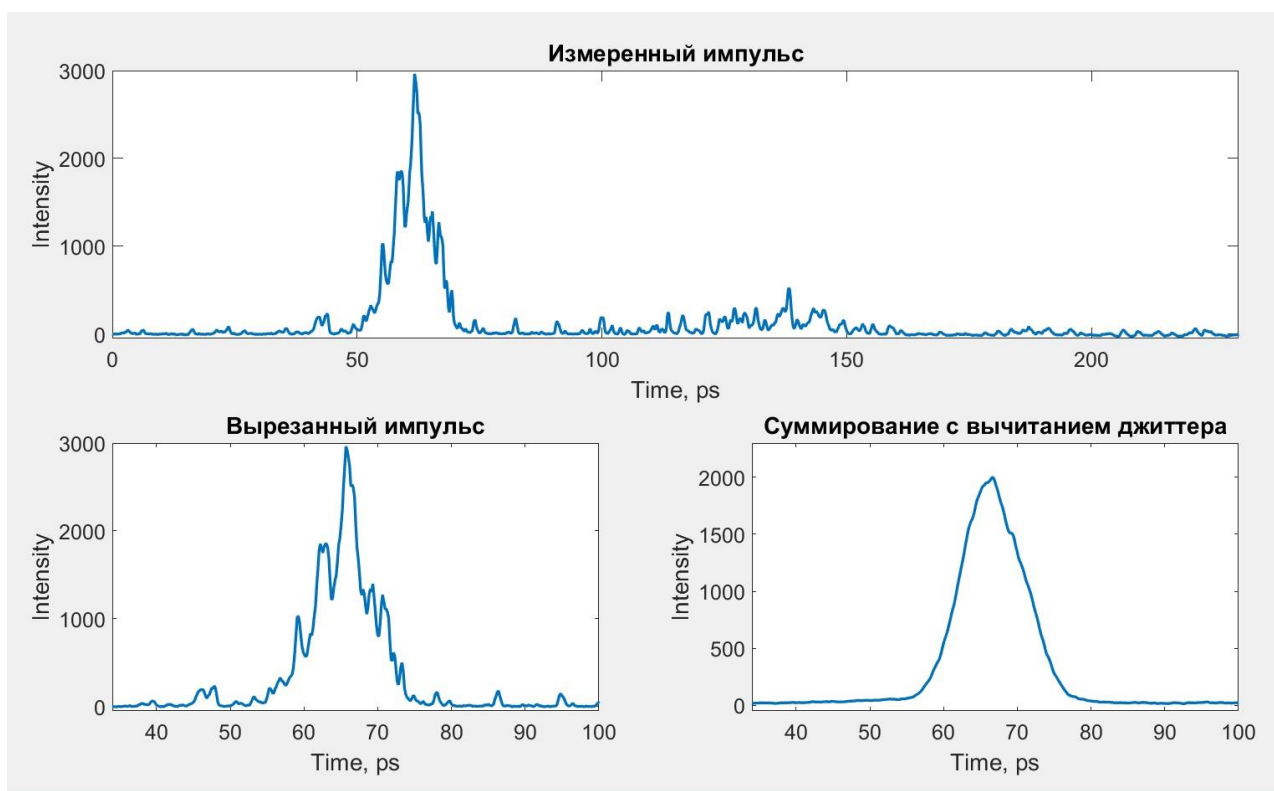


Рис. 5. Рабочее окно программы суммирования хронограмм с исключением джиттера во время эксперимента.

Данный алгоритм был реализован программно в интегрированной среде разработки Visual Basic. На рисунке 5 показано окно программы, которое наблюдает экспериментатор в процессе проведения измерений с применением алгоритма исключения джиттера. На верхнем графике отображается весь измерительный диапазон, содержащий исследуемый импульс. Нижний левый график показывает часть этого диапазона, содержащую измеряемый импульс, вырезаемую из него в соответствии с представленным выше алгоритмом. Суммирование при нахождении усредненного значения производится только по этим вырезанным импульсам. Результат усреднения отображается на нижнем правом графике. Видно, что в результате применения алгоритма при суммировании не происходит искажающего уширения результирующего импульса. Кроме того, усредненный импульс обладает гладкой формой и лишен изрезанности, свойственной исходному импульсу.

На рис. 6 представлена хронограмма светового импульса накачки, полученная в результате суммирования 160 одиночных хронограмм с применением алгоритма исключения джиттера. В эксперименте использовался тот же световой импульс, что и при измерениях хронограмм, представленных на рис. 2 и 3. Характерные параметры полученной хронограммы приведены в таблице 1. Как видим, хронограмма имеет гладкую симметричную форму. При этом для такой хронограммы не требуется дополнительных математических операций по сглаживанию, чтобы определить ее характерные параметры, поскольку отношение A/N , характеризующее максимальную относительную погрешность измерения интенсивности света в фиксированный момент времени, очень велико. Длительность импульса определяется однозначно, при максимальной абсолютной погрешности определения момента времени, в который интенсивность света имеет фиксированное значение $\delta\tau = 0.2$ пс (что фактически соответствует толщине линии графика $I_p = f(t)$).

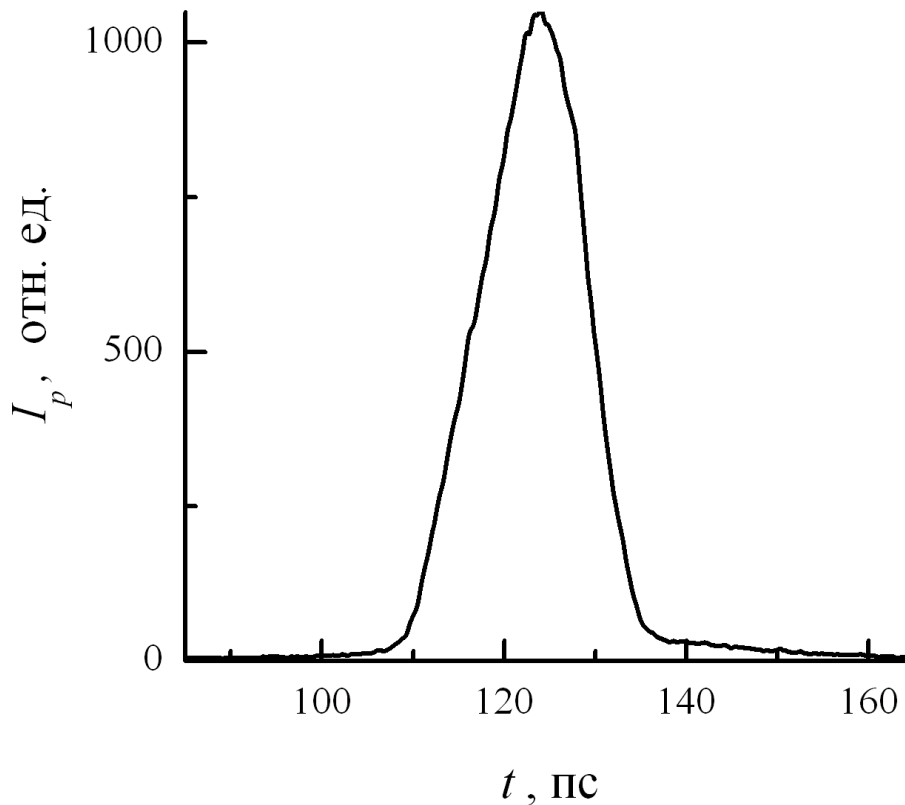


Рис. 6. Хронограмма импульса накачки, полученная в результате суммирования 160 одиночных хронограмм с вычитанием джиттера.

Заключение

Как позволяют судить приведенные данные, суммирование с применением алгоритма вычитания джиттера дает хороший результат. Применение разработанного алгоритма приводит к следующему.

- Шумовые импульсы, присутствующие на хронограммах, измеренных в однократном режиме, нивелируются. Параметр $A/N > 200$, что позволяет однозначно определять основные характерные параметры измеряемого сверхкороткого светового импульса;
- максимальная абсолютная погрешность определения момента времени δt , в который интенсивность света имеет фиксированное значение, равна около 0.2 пс, что позволяет с высокой точностью определять моменты разгорания и затухания сверхкоротких световых процессов.

Благодаря использованию данного алгоритма впервые удалось определить характерные времена разгорания и релаксации интегрального по спектру

стимулированного пикосекундного излучения GaAs, а также отдельных его спектральных компонент; обнаружить переключение спектральных мод стимулированного излучения, вызванное их вынужденным комбинационным рассеянием, и др., см. [4].

Литература

1. Бондаренко М.В., Слюсар В.И. Влияние джиттера АЦП на точность пеленгации цифровыми антенными решетками // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 2011. - № 8. – С. 41-49.
2. Smilkstein T.H. Jitter Reduction on High-Speed Clock Signals. – University of California at Berkley. 2007. – 208 p.
3. Рабаи Ж.М., Чандракасан А., Николич Б. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. Digital Integrated Circuits. 2-е изд. – М.: Вильямс. 2007. – 912 с.
4. Агеева Н.Н., Бронева И.Л., Забегаев Д.Н., Кривонос А.Н. Переключение спектральных мод пикосекундного стимулированного излучения GaAs вследствие их вынужденного комбинационного рассеяния при межзонных осцилляциях электронов в поле излучения // Радиотехника и электроника. – 2018. – Т.63, №10. – С. 1130-1140.
5. Гаранин С.Г., Бельков С.А., Рогожников Г.С., Рукавишников Н.Н., Романов В.В., Воронич И.Н., Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Лозовой В.И., Щелев М.Я. Использование пикосекундной стрик-камеры PS-1/S1 для диагностики многоканальных лазерных установок // – Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44, №8. – С. 798-800.
6. Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Лозовой В.И., Смирнов А.В., Шашков Е.В., Щелев М.Я. Пикосекундная электронно-оптическая камера PS-1/S1 в физическом эксперименте // ПТЭ. – 2016. – № 4. – С. 72-77.
7. Агеева Н.Н., Бронева И.Л., Забегаев Д.Н., Кривонос А.Н., Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Лозовой В.И., Щелев М.Я. Погрешности измерений

пикосекундных импульсов света с помощью пикосекундных стрик-камер // ПТЭ. – 2011. – № 4. – С. 108-115.

Для цитирования:

Н. Н. Агеева, И. Л. Броневой, Д. Н. Забегаев, А. Н. Кривоносов. Математический алгоритм устранения джиттера при измерении с помощью электронно-оптических камер усредненной хронограммы пикосекундного импульса света. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/13/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.11.13