УДК 681.787: 004.383.4

АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ПРИЕМНИК ОПТИЧЕСКИХ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

Аникеев Г.А., Гончарова П.С.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, e-mail: x-grifon93@mail.ru

Для исследования временных характеристик ультракоротких лазерных импульсов используются автокорреляционные приемники различных конструкций. Исследование ультракоротких лазерных импульсов основывается на принципе разделения лазерного пучка и последующей интерференции двух полученных пучков с изменяемой задержкой вторичного импульса относительно первоначального. В результате возможно построение автокорреляционной функции, которая представляет собой зависимость видности интерференционных полос от разности хода или временной задержки между интерферирующими лучами. В данной работе рассматривается автокоррелятор ультракоротких импульсов на основе интерферометра Майкельсона. Приведена методика измерения ультракоротких импульсов. Представлены схемы и рассмотрены принципы работы основных узлов автокорреляционного приемника: оптико-механической части (конструкция интерферометра Майкельсона) и электронной части, в которую входят фотоприемный модуль, блок управления и обработки данных с усилителем динамика, а также персональный компьютер.

Ключевые слова: автокоррелятор, ультракороткие импульсы, интерферометр Майкельсона

AUTOCORRELATION RECEIVER OF OPTICAL ULTRASHORT PULSES

Anikeev G.A., Goncharova P.S.

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: x-grifon93@mail.ru

To research the temporal characteristics of laser ultrashort pulses are used autocorrelators different constructions. Investigation of ultrashort laser pulses is based on the principle of separation of the laser beam, the interference of these two beams with a variable delay of the secondary pulse with respect to the initial pulse. As a result, it is possible to construct an autocorrelation function that is the dependence of the visibility of interference fringes on the path difference or time delay between interfering beams. In this paper is considered the autocorrelator of ultrashort pulses based a Michelson interferometer, his schemes and operating principles. The method of measuring ultrashort pulses is given. The schemes and principles of operation of the main nodes of the autocorrelation receiver are presented: the optical-mechanical part (the construction of the Michelson interferometer) and the electronic part, which includes a photodetector module, a control and data processing unit with a speaker amplifier, and a personal computer.

Keywords: autocorrelator, ultrashort pulses, a Michelson interferometer

Для получения полной характеристики ультракоротких импульсов (УКИ) необходимо измерить не только его спектр и энергию, но и временной профиль. Методика измерения спектра и энергии хорошо известна [4]. Измерение же временного профиля УКИ является сложной задачей из-за исключительно малой длительности импульса. Традиционные методы временных измерений с использованием фотоэлектронных устройств в сочетании с самыми быстродействующими осциллографами обеспечивают временное разрешение, на порядки уступающее длительности УКИ современных лазеров. В связи с этим для измерений характеристик УКИ применяются исключительно оптические методы, основанные на корреляционных методиках [4, 5].

Методика измерения ультракоротких импульсов

Информацию о временных характеристиках последовательности УКИ можно получить, измеряя автокорреляционную функцию интенсивности. В качестве приборов для измерения автокорреляционной функции применяются интерферометры различных конструкций. Исследование ультракоротких лазерных импульсов основывается на принципе разделения лазерного пучка, интерференции двух этих пучков с изменяемой задержкой вторичного импульса относительно первоначального и последующего получения автокорреляционной функции. В данной работе для реализации прибора измерения характеристик УКИ используется схема автокорреляционного приемника на основе интерферометра Майкельсона.

График автокорреляционной функции получается путем построения по оси ординат коэффициента корреляции двух функций (основной и функции сдвинутой на величину τ) и величины τ по оси абсцисс. В том случае, когда основная функция периодична, на графике автокорреляционной функции также будет строго периодическая функция. Из этого графика можно делать выводы о периодичности основной

функции и, следовательно, о её частотных характеристиках [3]. Принципиальная оптическая схема автокоррелятора на основе интерферометра Майкельсона приведена на рис. 1.

На детекторе автокоррелятора измеряется интенсивность интерферометрического взаимодействия двух пучков оптического импульса, зависящих от задержки τ:

$$I(t) = \int \left| E(t) + E(t-\tau) \right|^2 dt. \qquad (1)$$

Если интерферирующие импульсы на выходе интерферометра сильно разнесены в пространстве и не перекрываются, то сигнал на выходе равен половине мощности измеряемого импульса (так как половина падающего излучения отражается назад в направлении лазера зеркалами интерферометра Майкельсона). Когда импульсы перекрываются, регистрируют интерференционный сигнал, мощность которого изменяется от минимального значения, равного нулю, до максимального, равного мощности измеряемой последовательности импульсов. Коэффициент отражения света от интерферометра по отношению к падающему на него сигналу зависит от фазовых соотношений между интерферирующими в нем волнами. При возникновении максимумов и минимумов излучения на выходе интерферометра соответственно изменяется и коэффициент отражения света от него, сумма коэффициентов отражения и пропускания всегда равна единице.

Таким образом, автокорреляционная функция (АКФ) представляет собой зависимость видности интерференционных полос на выходе интерферометра Майкельсона от разности хода или временной задержки между интерферирующими лучами. Для сигнала в виде одиночного импульса ширину АКФ определяют по уровню половинной интенсивности от максимума огибающей АКФ. Для измерения АКФ одиночного импульса измерения интенсивности излучения на выходе интерферометра надо производить многократно для разных значений разности хода интерферирующих лучей. Поэтому для осуществления таких измерений необходимо иметь источник воспроизводимых импульсов.

Лазеры генерируют непрерывную последовательность одинаковых ультракоротких импульсов. Для измерений АКФ нет необходимости выделять отдельный ультракороткий импульс. Их выполняют в непрерывном режиме для бесконечной последовательности импульсов, так как расстояние между импульсами в последовательности обычно в десятки, а то и в сотни тысяч раз превышает длительность отдельного импульса [1].

Без использования произвольных предположений о форме огибающей ультракороткого лазерного импульса и фазовой модуляции его мгновенной несущей частоты корректно определить его временные характеристики на основании измерений спектра и автокорреляционных функций разных порядков невозможно. Это связано с тем, что фотоприемные устройства регистрируют среднюю интенсивность излучения. Высокая оптическая частота несущей и малая длительность самих импульсов исключают возможность использования прямых электронных методов измерения амплитуды электромагнитных колебаний. При измерениях спектра и корреляционных функций излучения обычно теряется информация о фазе колебаний, так как регистрируемые сигналы при этом пропорциональны квадрату амплитуды электромагнитных колебаний [1].

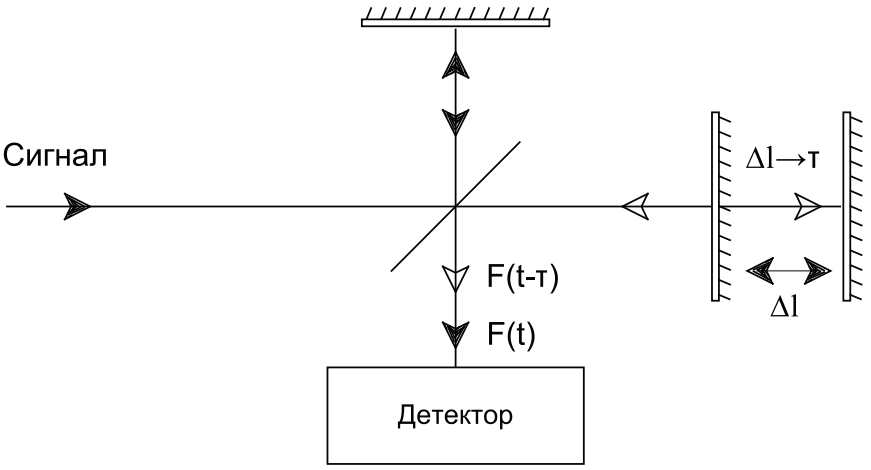


Рис. 1. Оптическая схема автокоррелятора на основе интерферометра Майкельсона

Пусть на интерферометр Майкельсона падает оптический импульс излучения, поле которого описывается функцией $E(t)$. На рис. 2, а показана расчетная зависимость интенсивности этого импульса с гауссовой огибающей от времени. Она определяется выражением

$$I(t)=\left[E(t)\right]^2=\left[E_0\exp\left(-\frac{t^2}{t_0^2}\cos\omega t\right)\right]^2. \quad (2)$$

Непосредственно зависимость интенсивности от времени не может быть измерена. На выходе интерферометра Майкельсона излучение обычно регистрируют инерционным приемником с постоянной времени T, значительно большей, чем длительность импульса. В зависимости от τ фотоприемник дает электрический сигнал, пропорциональный

$$I(\tau)=\frac{1}{t}\int_{t_0}^{t_0+T}\frac{1}{4}\left(E(t)+E(t-\tau)\right)^2dt=$$

$$=\frac{1}{2t}\int_{t_0}^{t_0+T}E(t)^2dt+\frac{1}{2T}\int_{t_0}^{t_0+T}E(t)E(t-\tau)dt, \quad (3)$$

где t_0 – произвольный момент начала регистрации.

В приведенной формуле первый интеграл представляет собой среднюю интенсивность излучения, которая зависит от постоянной времени фотоприемника и энергии импульса. Эта интенсивность не зависит от разности хода лучей в интерферометре. Второй интеграл – есть автокорреляционная функция первого порядка поля излучения. Это кривая видности интерференционных полос, введенная Майкельсоном.

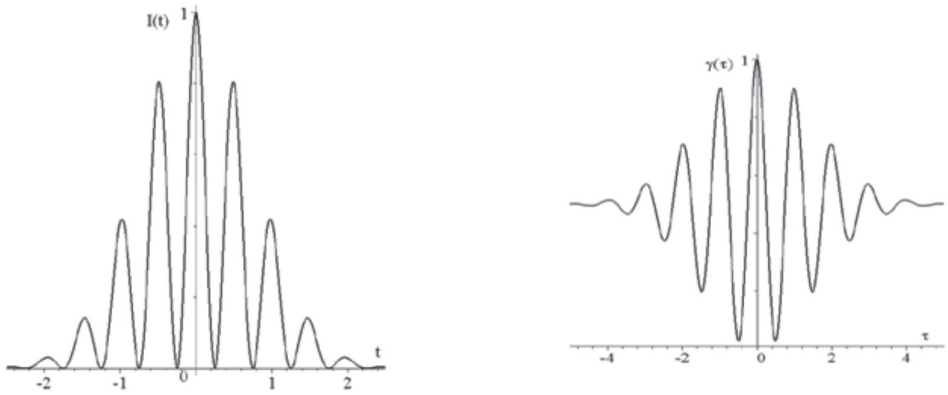
На рис. 2, б показана АКФ первого порядка, рассчитанная для импульса длительностью t_p. Она определяется следующим выражением:

$$\text{АКФ}_2(\tau)=1+\exp\left(-2\ln 2\left(\frac{\tau}{t_p}\right)^2\right)+$$

$$+4\exp\left(-\frac{3}{2}\ln 2\left(\frac{\tau}{t_p}\right)^2\right)\cos\omega\tau+$$

$$+2\exp\left(-2\ln 2\left(\frac{\tau}{t_p}\right)^2\right)\cos^2\omega\tau. \quad (4)$$

Из рис. 2 видно, что АКФ является симметричной не только относительно нулевой разности хода, но и относительно среднего значения энергии излучения (фоновой интенсивности). Среднее значение энергии регистрируется в том случае, когда временная задержка между интерферирующими импульсами превышает его длительность, то есть импульсы не перекрываются во времени и в пространстве. Ширина огибающей АКФ для гауссова импульса в два раза больше длительности самого импульса. Для фемтосекундных лазеров измеряют АКФ с разрешением интерференционных полос. Экспериментально это требует применения высококачественной аппаратуры и развязки интерферометра от технических флуктуаций пола помещения лаборатории и устранения акустических шумов в лаборатории [1].



а) *б)*

Рис. 2. Зависимость интенсивности импульса с гауссовой огибающей от времени (а); АКФ первого порядка (б)

На практике регистрируют огибающую АКФ, так как АКФ ультракоротких лазерных импульсов может содержать тысячи интерференционных максимумов. Для этого интерференционные полосы, возникающие на выходе интерферометра Майкельсона, сканируют относительно апертуры фотоприемника и регистрируют только переменную составляющую его сигнала. Такого сканирования достигают за счет колебаний одного из зеркал вдоль оптической оси интерферометра с амплитудой порядка половины длины волны излучения, либо непрерывно перемещая зеркала интерферометра со строго постоянной скоростью.

Разработка экспериментальной установки

Автокорреляционный приемник можно разделить на две части:

– оптико-механическая часть (конструкция интерферометра Майкельсона);

– электронная часть, в которую входят фотоприемный модуль, блок управления и обработки данных с усилителем динамика, персональный компьютер.

Схема оптико-механической части автокоррелятора приведена на рис. 3. Полупрозрачное зеркало (2) разделяет падающий поток света для дальнейшей интерференции. Крайне важным элементом в работе автокоррелятора на основе интерферометра Майкельсона является система, обеспечивающая смещение подвижного зеркала относительно полупрозрачного зеркала для изменения разности хода между опорным и информационными импульсами [2]. При изменении разности хода между этими импульсами происходит их интерференция, что приводит к изменению показаний фотоприемника. В данной установке подвижное зеркало (4) расположено на мембране динамика (5). При подаче напряжения на динамик происходит смещение мембраны, а вместе с ней и зеркала, на уровень, соответствующий приложенному напряжению.

Механическая конструкция автокоррелятора обладает возможностью изменения положения относительно входящего светового потока (1), а также позволяет юстировать все имеющиеся оптические компоненты. Для этого предусмотрена возможность перемещения площадки с интерферометром. Неподвижное зеркало (3) можно перемещать вдоль оси для изменения разности между двумя плечами интерферометра, кроме того, имеется возможность наклона этого зеркала с помощью юстировочных винтов (6). Расстояние от полупрозрачного диагонального зеркала до динамика возможно изменять для настройки интерферометра. Также динамик можно юстировать винтами (7) для настройки соосности системы.

Схема электронной части установки представлена на рис. 4.

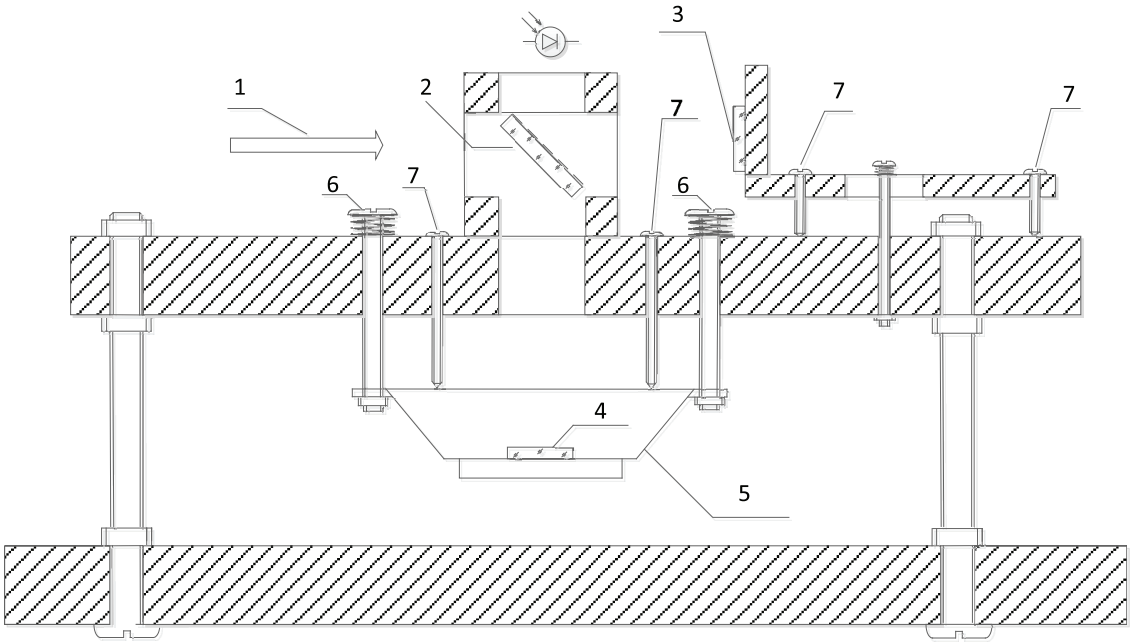


Рис. 3. Схема оптико-механической части автокоррелятора

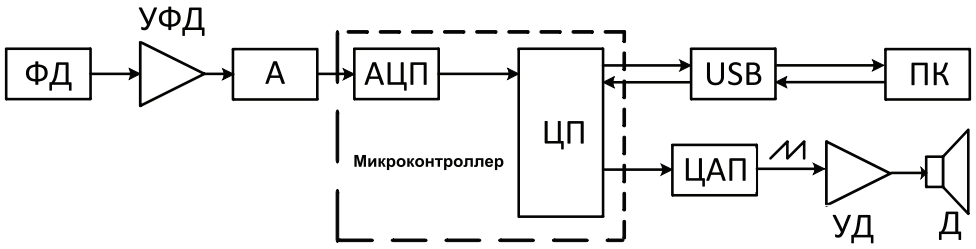


Рис. 4. Схема электронной части установки

Основу электронной части составляют:
– фотоприемный модуль;
– блок управления и обработки данных;
– персональный компьютер.

Блок управления и обработки данных объединяет в себе плату управления, блок питания, фильтр блока питания и усилитель динамика. На плате управления расположен микроконтроллер со встроенным 10-битным аналогово-цифровым преобразователем (АЦП), предназначенным для оцифровки сигнала, поступающего с фотоприемного модуля. Микроконтроллер при помощи внешнего цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) генерирует пилообразный сигнал, который усиливается усилителем динамика (УД) и поступает на динамик (Д). Подвижное зеркало расположено на мембране динамика. При подаче напряжения на динамик происходит смещение мембраны, а вместе с ней и зеркала, на уровень, соответствующий приложенному напряжению. В результате движения динамика меняется разность плеч и возникает интерференционная картина, фиксируемая фотоприемным модулем. Фотоприемный модуль состоит из фотодиода (ФД) и усилителя фотодиода (УФД). В связи с тем, что напряжение сигнала, поступающего на АЦП с фотоприемного модуля, может быть выше максимально возможного уровня напряжения, которое может обработать АЦП, установлен аттенюатор (А) с регулируемым коэффициентом ослабления. Затем оцифрованные данные передаются на персональный компьютер в специальное программное обеспечение.

В основе платы управления используется микроконтроллер AVR ATmega32 компании Atmel. Он поддерживает режим внутрисхемного программирования, что ускоряет процесс разработки и отладки устройств с этим контроллером. Частота микроконтроллера задается кварцевым резонатором, имеющим частоту 16 МГц. Для генерации аналогового сигнала применяется внешняя микросхема ЦАП DAC8551. Он подключается к микроконтроллеру через интерфейс SPI. Из-за того, что цифро-аналоговый преобразователь генерирует униполярный сигнал, а для динамика требуется биполярный, применяется стандартная схема с использованием операционного усилителя OP213FSZ. Цифро-аналоговый преобразователь генерирует пилообразный сигнал с периодом 75 с, который подается на усилитель динамика. Для получения требуемого напряжения на выходе ЦАП необходимо передать ему двоичный код, состоящий из 16 символов, где все единицы соответствуют напряжению 5 В, а все нули – напряжению 0 В. Для питания ЦАП и операционного усилителя используется микросхема источника опорного напряжения. Аттенюатор представляет собой микросхему аналоговых ключей. Она позволяет программно изменять сопротивление делителя напряжения и ослаблять сигнал с фотоприемного модуля максимум в 8 раз. Для удобства ручной настройки уровня мембраны динамика в конструкцию блока управления был добавлен программируемый энкодер, подключаемый к плате управления. При этом шаг смещения мембраны также задается программным путем. Для связи платы управления с персональным компьютером применяется интерфейс USB, реализуемый микросхемой FT232RL. Эта микросхема позволяет создать мост USB – UART, поддерживает интерфейс USB 2.0 и имеет встроенную память с возможностью программирования. Усилитель динамика сконструирован на базе микросхемы усилителя LM1875, с использованием стандартной схемы включения. Фотоприемный модуль состоит из фотодиода ФД-256А и усилителя фотодиода, собранного на микросхеме операционного усилителя LM358.

Заключение

Предварительная юстировка и настройка подтвердили работоспособность экспериментальной установки автокорреляционного приемника на основе интерферометра

Майкельсона. Данная экспериментальная установка позволит проводить различные эксперименты, связанные с исследованием характеристик оптических ультракоротких импульсов.

Список литературы

1. Борисов В.И. Введение в оптику ультракоротких лазерных импульсов [Текст] / В.И. Борисов, В.И. Лебедев, С.Н. Перепечко. – Могилев: МГУ им. А.А. Кулешова. – 2004. – 310 с.

2. Зубов В.А., Крайский А.В., Султанов Т.Т., Хлебников А.Г. Коррелятор на основе модифицированного интерферометра Майкельсона с управлением от ЭВМ [Текст] // Автометрия. – 1984. – № 2. – С. 84.

3. Кальянов А.Л., Лычагов В.В., Лякин Д.В., Перепелицына О.А., Рябухо В.П. Оптическая низкокогерентная интерферометрия и томография: Учебное пособие / Под ред. В.П. Рябухо. – Саратов: СГУ имени Н.Г. Чернышевского, 2009. – 86 с.

4. Крюков П.Г. Лазеры ультракоротких импульсов [Текст] / П.Г. Крюков // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, № 2. – С. 95–119.

5. Машкович Е.А., Бакунов М.И. Автокорреляционные методы измерения длительности ультракоротких лазерных импульсов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.unn.ru/e-library/methodmaterial.html?pscience=2 (дата обращения: 10.05.17).