

УДК 621.387.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ ВРЕМЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ

**В. С. Зоркин**, ассистент кафедры ГРП РГРТУ, аспирант; vladimir.zorkin@mail.ru

**А. А. Кондрахин**, к.т.н., директор ОАО «ПЛАЗМА»; kondrahin\_a@mail.ru

**Е. Г. Чуляева**, д.т.н., профессор кафедры ГРП РГРТУ; elenachuljaeva@yandex.ru

**М. Ю. Кернос**, с.н.с. ЗАО «МОСТКОМ»; mkern@yandex.ru

**Е. Ю. Гомозкова**, магистр, инженер кафедры ГРП РГРТУ; gomo849@mail.ru

**Г. В. Мельничук**, д.э.н., заведующий кафедрой ГРП РГРТУ, vladimir.zorkin@mail.ru

*Целью работы являются исследование метода измерения длины временной когерентности лазерного излучения, описанного в [1, 2], а также оценка погрешности измерения длины временной когерентности. Рассматриваемый метод отличается от метода, рекомендуемого отраслевым стандартом, модуляцией интенсивности опорного сигнала, а также отсутствием в измерительной схеме микрометрической щели и устройства сканирования. Изучение представленного метода актуально ввиду несовершенства метода измерения длины временной когерентности, предлагаемого отраслевым стандартом. Авторами статьи исследована теория, лежащая в основе данного метода. Проведён математический расчёт влияния модуляции длины опорного плеча интерферометра Майкельсона на выходной сигнал интерферометра. Оценена погрешность измерений. Представлены экспериментальные данные, подтверждающие правильность теоретических расчётов. Исследования показали, что погрешность данного метода ниже, чем метода, рекомендуемого отраслевым стандартом.*

**Ключевые слова:** длина временной когерентности, видность, интерферометр Майкельсона, разность хода, опорное плечо, модуляция, пьезокерамическая подложка, интенсивность, He-Ne лазер.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-163-168

### Введение.

В современной науке и технике существует задача по созданию лазеров с высокой степенью когерентности. Одни из лазеров обеспечивают получение контрастных голографических изображений, а другие являются средствами измерения линейных перемещений.

В связи с этим актуальным является вопрос о выборе более точных методов измерения величин, характеризующих способность излучения создавать контрастные интерференционные картины.

### Теоретическая часть.

Для определения понятия “временная когерентность” рассматривается электрическое поле, полученное в результате сложения двух электрических полей  $E_1(t)$ ,  $E_2(t)$ , при поле  $E_2(t) = E_1(t-\tau)$ . Поля  $E_1(t)$  и  $E_2(t)$  излучаются одним точечным источником, но  $E_2(t)$  распространяется с задержкой во времени  $\tau$  относительно  $E_1(t)$ . Суммарное поле в точке наблюдения  $P$  равно [3]:

$$E_R(t, \tau) = E_1(t) + E_2(t) = E_1(t) + E_1(t-\tau). \quad (1)$$

Введём следующие обозначения:  $E_1(t) = E(t)$ ;  $E_1(t-\tau) = E(t-\tau)$ .

При размещении в точке наблюдения квадратичного детектора с большим временем установления будет зарегистрирована следующая величина интенсивности светового поля [3]:

$$I(t, \tau) = \lim_{\Delta T \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta T} \int_t^{t+\Delta T} E_R(t', \tau) E_R^*(t', \tau) dt' \neq 0, \quad (2)$$

где \* обозначает сопряжённую величину.

В предположении, что источник света является стационарным, выражение (2) принимает форму:

$$I(t, \tau) \equiv \lim_{\Delta T \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} E_R(t', \tau) E_R^*(t', \tau) dt' \neq 0,$$

что означает следующее:

$$I(t, \tau) \equiv I(\tau). \quad (3)$$

Из соотношений (2) и (3) следует:

$$I(\tau) = \overline{|E(t)|^2} + \overline{|E(t-\tau)|^2} + 2 \cdot \overline{|E(t) \cdot E^*(t-\tau)|^2}. \quad (4)$$

Первый и второй члены равенства (4) есть интенсивности первого и второго складываемых

лучей, а третий член равенства характеризует степень согласованности рассматриваемых колебаний. Черта над выражением обозначает усреднение по времени.

Обозначим

$$I(\tau) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \text{Re} f(\tau), \quad (5)$$

где  $I_1, I_2$  — интенсивности складываемых пучков света;  $f(\tau)$  — функция степени запаздывания;  $\text{Re} f(\tau)$  — действительная часть  $f(\tau)$ .

Для квазимонохроматического света значения напряжённостей электрического поля определяются следующими соотношениями [4]:

$$E(t) = a_1(t)e^{i\omega_0 t}, \quad (6)$$

$$E(t - \tau) = a_2(t - \tau)e^{i\omega_0(t - \tau)}, \quad (7)$$

где  $a_1(t), a_2(t - \tau)$  — комплексные амплитуды напряжённости электрических полей;  $\omega_0$  — круговая частота электрического поля;  $i$  — мнимая единица.

Подставляя выражения (6) и (7) в равенство (2), получаем [4]:

$$a_1(t)a_2^*(t - \tau) \cdot e^{i\omega_0 \tau} = \sqrt{I_1 \cdot I_2} f(\tau). \quad (8)$$

Функция  $f(\tau)$  есть быстро меняющаяся функция времени запаздывания  $\tau$ ; разделив ее на столь же быстроменяющуюся функцию  $e^{i\omega_0 \tau}$ , получим медленно меняющуюся функцию  $\gamma(\tau)$ :

$$\gamma(\tau) = f(\tau)e^{-i\omega_0 \tau}. \quad (9)$$

Функция (9) называется комплексной степенью когерентности, а ее модуль — степенью когерентности колебаний в т. Р.

Таким образом,

$$a_1(t)a_2^*(t - \tau) = \sqrt{I_1 I_2} \gamma(\tau). \quad (10)$$

Т.е.  $\gamma(\tau)$  есть нормированная взаимная корреляционная функция для амплитуд  $a_1$  и  $a_2$  [4]. Учитывая равенство (5), записываем:

$$I(\tau) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \text{Re}\{\gamma(\tau)e^{i\omega_0 \tau}\}. \quad (11)$$

В вещественной форме выражение (11) запишется в виде [4]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma(\tau)| \cos(\omega_0 \tau + \delta), \quad (12)$$

где  $\delta$  — изменение фазы сигнала при переходе от одной интерференционной полосы к другой.

Тогда максимальную и минимальную интенсивности можно описать следующими соотношениями [4]:

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma(\tau)|, \quad (13)$$

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma(\tau)|. \quad (14)$$

Степень различимости интерференционных полос на фоне средней интенсивности называется видностью [5]:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2 \cdot \sqrt{I_1 \cdot I_2}}{I_1 + I_2} \cdot |\gamma(\tau)|, \quad (15)$$

где  $I_{\max}, I_{\min}$  — максимум и минимум интенсивности интерференционной картины соответственно.

В случае  $I_1 = I_2$  выражение (15) примет вид [5]:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = |\gamma(\tau)|. \quad (16)$$

Рассмотрим схему формирования интерференционного сигнала в интерферометре, представленную на рисунке 1.

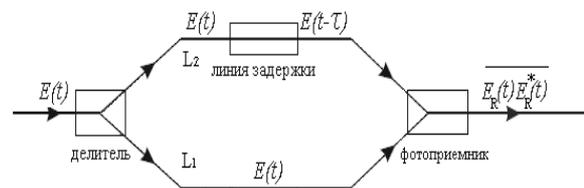


Рисунок 1 — Схема формирования интерференционного сигнала.

$L_1$  и  $L_2$  — длина пути в опорном и измерительном плече соответственно

В интерферометр вводится квазимонохроматическое излучение  $E(t)$  в узком диапазоне частот  $f_0 \pm \Delta f$ , где  $\Delta f$  — полуширина спектральной линии. С целью упрощения расчётов контур спектра представлен в виде прямоугольника. Интенсивность такого излучения будет определяться следующим соотношением:

$$I(f) \sim 2 \int_{f_0 - \Delta f}^{f_0 + \Delta f} df = 4\Delta f. \quad (17)$$

Излучение, регистрируемое фотоприемником, будет представлять собой сумму сигналов [3]:

$$I(\tau) \sim 2 \int_{f_0 - \Delta f}^{f_0 + \Delta f} df + 2 \int_{f_0 - \Delta f}^{f_0 + \Delta f} \cos(2\pi f \tau) df. \quad (18)$$

Первое слагаемое соотношения (18) представляет собой излучение лазера с оптической частотой, второе слагаемое является интерференционным членом.

Произведя интегрирование в выражении (18), получим зависимость интенсивности в интерференционной картине от разности хода  $\Delta$  между интерферирующими лучами [3]:

$$I(\tau) \sim 4 \cdot \Delta f + \frac{4 \cdot \Delta f \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot \tau)}{2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot \tau} \times \frac{4 \cdot \Delta f \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \tau)}{2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot \tau}, \quad (19)$$

где  $c$  — скорость света.

С учетом того, что время запаздывания за-

держанного луча составляет  $\tau = \frac{\Delta}{c}$ , выражение (19) приобретает вид:

$$I(\Delta) \sim 4 \cdot \Delta f + \frac{4 \cdot \Delta f \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot \frac{\Delta}{c}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot \frac{\Delta}{c}} \times \frac{4 \cdot \Delta f \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \frac{\Delta}{c}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot \frac{\Delta}{c}} \quad (20)$$

Однако, используя данную схему, затруднительно провести измерение длины временной когерентности, т. к. фотоприёмник будет регистрировать только постоянную составляющую поступающего на него сигнала.

С целью приспособления интерферометра Майкельсона для измерения длины временной когерентности в [6] внесены изменения в его устройство. Данный метод обладает высокой относительной погрешностью  $\pm 25\%$  и большой трудоёмкостью.

В настоящей работе предлагается представить интенсивность в опорном плече интерферометра в виде переменного сигнала. Для этого в опорное плечо вводится модуляция длины  $L_1$ . Таким образом, можно получить явление, названное нами динамической интерференцией. Схема вышеописанного устройства представлена на рисунке 2. В этом случае выражение для интенсивности приобретает вид, описываемый формулой (21).

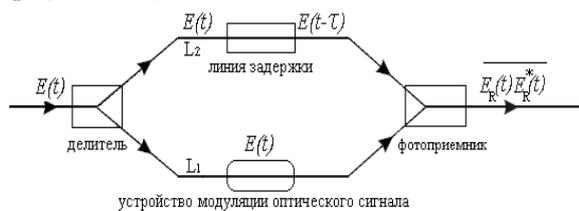


Рисунок 2 — Схема формирования динамического интерференционного сигнала

$$I(\Delta) \sim 4 \cdot \Delta f + \frac{4 \cdot \Delta f \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot \frac{\Delta + d \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot t)}{c}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot \frac{\Delta + d \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot t)}{c}} \times \frac{4 \cdot \Delta f \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \frac{\Delta + d \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot t)}{c}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot \frac{\Delta + d \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot t)}{c}} \quad (21)$$

где  $d = 5 \text{ мкм}$  — максимальное изменение длины опорного плеча, м;  $\xi = 50 \text{ Гц}$  — частота модуляции.

На рисунке 3 представлена зависимость интенсивности интерференционного сигнала от времени при различных разностях хода  $\Delta$  с введением модуляции в опорное плечо, построенная по формуле (21). Используемые в расчёте параметры, такие как ширина спектральной линии и

длина волны излучения, соответствуют линейно поляризованному He-Ne лазеру. Значения интенсивностей  $I_1, I_2$  приняты равными, что позволяет применять формулу (16).

Из рисунка 3 видно, что при изменении разности хода изменяется амплитуда размаха колебаний интенсивности. Все это позволяет достоверно определить интенсивности как максимальную, так и минимальную и соответственно видность интерференционной картины.

Зависимость видности интерференционной картины от разности хода  $\Delta$ , построенная по формуле (17), представлена на рисунке 4.

За длину временной когерентности принимают значение  $\Delta$ , при котором видность снижается до уровня 0.5 от максимального значения. Расчётная длина временной когерентности  $l$  составила 0.24 м.

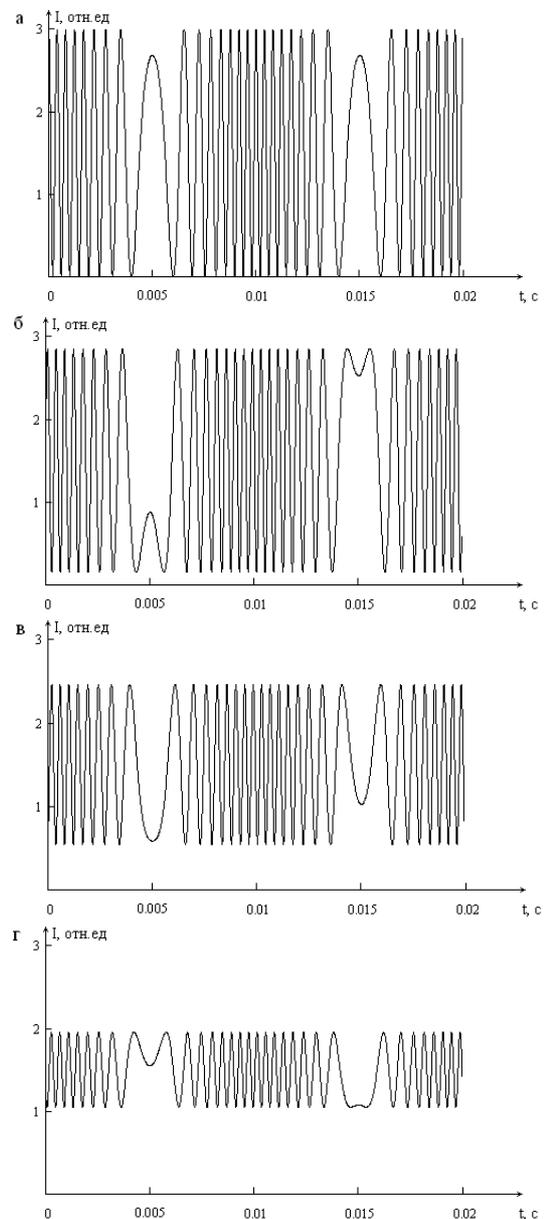


Рисунок 3 — Регистрируемый сигнал: а —  $\Delta = 0 \text{ м}$ ; б —  $\Delta = 0.1 \text{ м}$ ; в —  $\Delta = 0.2 \text{ м}$ ; г —  $\Delta = 0.3 \text{ м}$

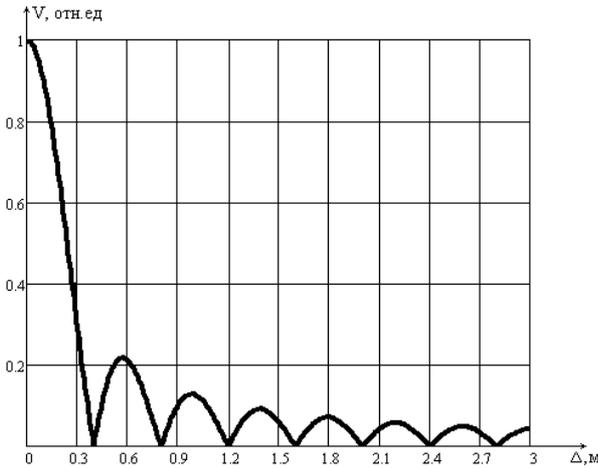


Рисунок 4 — Зависимость видности интерференционной картины от разности хода Δ

На рисунке 5 представлена зависимость величины ρ от Δ, построенная по следующему соотношению:

$$\rho = |V_n - V_m|, \tag{22}$$

где  $V_n$  и  $V_m$  — видности интерференционной картины, соответствующие выражениям (20) и (21).

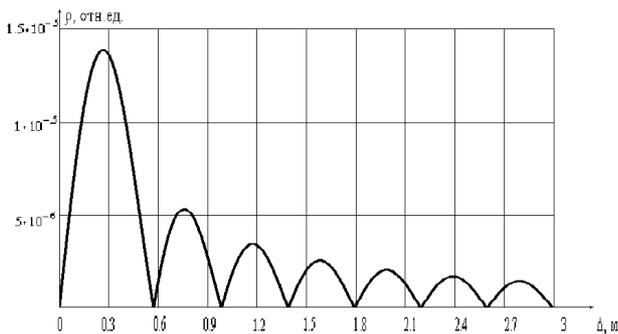


Рисунок 5 — Зависимость величины ρ от Δ

Из рисунка 5 можно сделать вывод, что изменения, внесённые в классический интерферометр Майкельсона, практически не оказывают негативного влияния на результат измерения.

Относительная погрешность косвенных измерений видности интерференционной картины рассчитывается по формуле (23), предложенной в [6]:

$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \left( \frac{\partial \ln f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \left( \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2}, \tag{23}$$

где  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  — функция, содержащая непосредственно измеряемые величины  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .  $\Delta x_i$  — абсолютная погрешность непосредственного измерения величины  $x_i$ .

Подставляя в (23) формулу (16) и учитывая, что интенсивности  $I_{max}$  и  $I_{min}$  соответствуют напряжениям  $v_{max}$  и  $v_{min}$ , измеряемым с помощью осциллографа, получаем следующее соотношение:

$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{v_{max}^2 \cdot \left( \frac{2 \cdot v_{min}}{v_{max}^2 - v_{min}^2} \right)^2 \cdot \left( \frac{\Delta v_{max}}{v_{max}} \right)^2 + v_{min}^2 \cdot \left( \frac{2 \cdot v_{max}}{v_{max}^2 - v_{min}^2} \right)^2 \cdot \left( \frac{\Delta v_{min}}{v_{min}} \right)^2}. \tag{24}$$

С учётом того, что значения  $v_{max}$  и  $v_{min}$  снимаются одновременно с одной и той же осциллограммы, относительные погрешности измерения этих величин можно считать равными. Введём обозначение:

$$\frac{\Delta v_{max}}{v_{max}} = \frac{\Delta v_{min}}{v_{min}} = \frac{\Delta v}{v}, \tag{25}$$

где  $\frac{\Delta v}{v}$  — относительная погрешность отсчёта значения сигнала осциллографа.

С учетом равенства (25) конечное соотношение для оценки относительной погрешности измерения видности интерференционной картины будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{8 \cdot v_{max}^2 \cdot v_{min}^2 \cdot \left( \frac{\Delta v}{v} \right)^2 \cdot \left( v_{max}^2 - v_{min}^2 \right)^2}. \tag{26}$$

Измерение величины  $\frac{\Delta V}{V}$  проводится для каждого значения Δ по формуле (26), после чего находится его среднее значение  $\left( \frac{\Delta V}{V} \right)_{cp}$ .

Относительная погрешность длины временной когерентности вычисляется по следующей формуле:

$$\frac{\Delta l}{l} = \left( \frac{\Delta V}{V} \right)_{cp}. \tag{27}$$

Относительная погрешность измерений современных цифровых осциллографов составляет величину 1 – 3 % [7], что определяет величину относительной погрешности длины временной когерентности в пределах ± 10 %.

**Экспериментальная часть.** Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 6 и представляет собой модернизированный интерферометр Майкельсона [8].

В эксперименте в качестве источника излучения использовался лазер ЛГН — 220 [9].

Излучение лазера направляется на 50% полупрозрачное зеркало 2, где расщепляется на два луча. Зеркала 3 и 5 образуют интерферометр Майкельсона. Расстояние  $L_1$  модулируется с частотой 50 Гц и амплитудой 5 мкм. Для этого зеркало 3 крепится на пьезокерамическую подложку, на которую подаётся переменное напряжение через автотрансформатор 4. Лучи, отражённые

от зеркал 3 и 5, формируют интерференционную картину, которая регистрируется фотоприемником 6. Эксперимент выполнен для нескольких значений  $L_2$ .

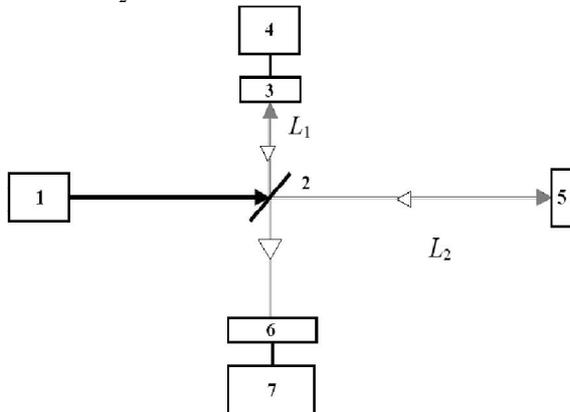


Рисунок 6 — Схема экспериментальной установки: 1 — лазер ЛГН – 220, 2 — делительное зеркало с коэффициентом отражения 50 %, 3 — зеркало с пьезокорректором, 4 — лабораторный автотрансформатор, 5 — зеркало, 6 — фотодиод, 7 — осциллограф.  $L_1$  — опорное плечо,  $L_2$  — измерительное плечо

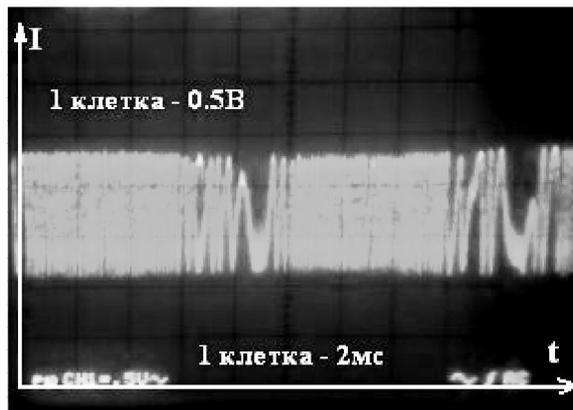


Рисунок 7 — Осциллограмма регистрируемого сигнала

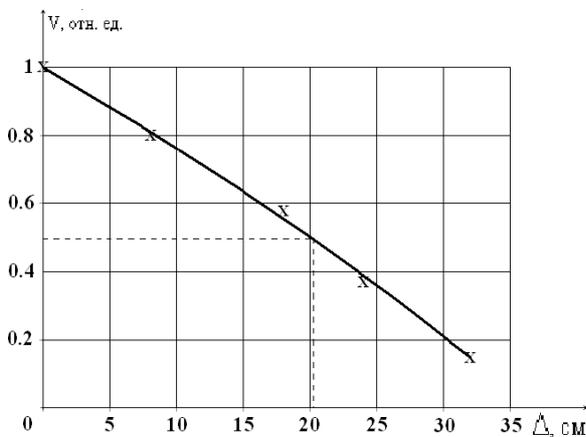


Рисунок 8 — Экспериментально полученная зависимость видности интерференционной картины от разности хода  $\Delta$

Пример регистрируемого сигнала и экспериментально полученная зависимость видности интерференционной картины от разности хода  $\Delta$  представлены на рисунках 7 и 8 соответственно. При этом значение длины временной когерентности  $l$  составляет 20.5 см.

### Выводы.

В статье проведён сравнительный анализ двух методов измерения длины временной когерентности. Метод, предлагаемый авторами статьи, основан на модуляции длины одного из плеч интерферометра Майкельсона. Суть ранее используемого метода, рекомендуемого отраслевым стандартом [6], заключается в перемещении интерференционной картины, полученной при помощи интерферометра Майкельсона, относительно микрометрической щели и регистрации сигнала на её выходе фотоприёмником.

Исследования показали, что предлагаемый метод по точности превосходит ранее используемый не менее чем в два раза. Более того, метод обладает большей простотой исполнения вследствие исключения из схемы микрометрической щели и устройства сканирования, усложняющих процесс измерения.

### Библиографический список

1. Патент № 106371. РФ. Устройство измерения временной когерентности / Е. Г. Чуляева, М. Ю. Керносов.
2. Воробьев П. Г., Керносов М. Ю., Чуляева Е. Г., Кондрахин А. А., Мельничук Г. В. Методы измерения параметров частотно-стабилизированных лазеров // Фотоника. Вып. № 3. 2013. С. 36 – 39.
3. Струок. Д. Введение в когерентную оптику и голографию. – М., 1967. – 347 с.
4. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Том 4. Оптика. – М., 1980. – 752с.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М., 1979. – 720 с.
6. Лазеры газовые. Методы измерения когерентности. ОСТ 11-397.803-80.
7. Сайт. URL: [http://www.prist.ru/info/articles/general\\_ch\\_modern\\_oscilloscopes.htm](http://www.prist.ru/info/articles/general_ch_modern_oscilloscopes.htm) (дата обращения 10.09.2015).
8. Борисовский С. П., Керносов М. Ю., Степанов В. А., Чуляева Е. Г. Исследование свойств лазерного излучения одночастотного лазера повышенной мощности // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. 2007. № 20. С. 99-103.
9. Сайт фирмы АО «Плазма». URL: <http://www.plasmalabs.ru/category/index/id/4> (дата обращения 01.09.2015).

UDC 621.387.3

## RESEARCH OF TEMPORAL COHERENCE LENGTH MEASUREMENT METHOD

**V. S. Zorkin**, post-graduate student, assistant RSREU, Ryazan; vladimir.zorkin@mail.ru

**A. A. Kondrakhin**, PhD (technical sciences), Director of JSC "PLASMA", Ryazan; kondrahin\_a@mail.ru

**E. G. Chulyaeva**, PhD (technical sciences), full professor, RSREU, Ryazan; elenachuljaeva@yandex.ru

**M. Yu. Kernosov**; senior researcher of JSC "Mostcom", Ryazan; mkern@yandex.ru

**E. Yu. Gomozkova**, master of Science, engineer RSREU, Ryazan; gomo849@mail.ru

**G. V. Melnichuk**, PhD (economic sciences), Head of the Department, RSREU, Ryazan, vladimir.zorkin@mail.ru

*The paper objective is the research of the method measuring the length of temporal coherence, which is described in [1, 2] and estimation of method error. The method differs from the method recommended by industry standard with modulation of intensity reference signal. Furthermore, a new method does not include micrometric slit and scanning device. The research of described method is actual, because the method recommended by industry standard is not perfect. The theory underlying the method is studied. The effect of modulation to Michelson interferometer support arm length on output signal is calculated. The measurement error is calculated. Test data, which confirm theoretical calculations, are shown. The text shows that the error of described method is less than the error of the method recommended by industry standard.*

**Key words:** length of temporal coherence, contrast, Michelson interferometer, path difference, support arm, modulation, piezoceramic substrate, intensity, He – Ne lasers.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2016-56-2-163-168

### References

1. Patent № 106371. RF. Ustrojstvo izmerenija vremenoj kogerentnosti / **E. G. Chuljaeva, M. Yu. Kernosov** (in Russian).

2 **Vorobyev P. G., Kernosov M. Yu., Chuljaeva E. G., Kondrakhin A. A., Melnichuk G. V.** Metody izmerenija parametrov chastotno – stabilizirovannyh lazerov. *Fotonika*. 2013, vol. 3, pp. 36 – 39 (in Russian).

3. **Strouk. D.** *Vvedenie v kogerentnuju optiku i golografiju* (An introduction to coherent optics and holography). Moscow: 1967, 347 p. (in Russian).

4. **Sivuhin D. V.** *Obshhij kurs fiziki. Tom 4. Op-tika* (General course of physics. Volume 4. Optics). Moscow: 1980, 752 p. (in Russian).

5. **Born M., Volf Je.** *Osnovy optiki* (Principles of

optics). Moscow: 1979, 720 p. (in Russian).

6. Lazery gazovye. Metody izmerenija kogerentnosti. OST 11-397.803-80 (in Russian).

7 Sajt. URL: [http://www.prist.ru/info/articles/general\\_ch\\_modern\\_oscilloscopes.htm](http://www.prist.ru/info/articles/general_ch_modern_oscilloscopes.htm) (data obrashhenija 10.09.2015).

8. **Borisovskij S. P., Kernosov M. Yu., Stepanov V. A., Chuljaeva E. G.** Issledovanie svojstv la-zernogo izluchenija odnochastotnogo lazera povyshennoj moshhnosti. *Vestnik Rjazanskoj gosudarstvennoj radiotekhnicheskoy akademii*. 2007, no. 20, pp. 99-103 (in Russian).

9. Sajt firmy AO «Plazma». URL: <http://www.plasmalabs.ru/category/index/id/4> (data obrashhenija 01.09.2015).