

ВЛИЯНИЕ ШУМОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ФАЗЫ НА ПРОФИЛЬ УЛЬТРАКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА

В. АВETИСЯН¹, М. СУКИАСЯН^{1,2*}, А. АВETИСЯН¹,
А. КИРАКОСЯН¹, А. КУТУЗЯН¹

¹Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

²Институт синхротронных исследований CANDLE, Ереван, Армения

*e-mail: minas.suqiasyan@ysu.am

(Поступила в редакцию 22 мая 2024 г.)

На основе численных и экспериментальных исследований проведен анализ влияния шумовой составляющей в определении спектральной фазы ультракороткого импульса в задачах восстановления профиля импульса. Рассматривался аддитивный белый шум и было показано, что погрешность восстановления поля становится пропорциональной произведению спектральной амплитуды и погрешности определения спектральной фазы при малых значениях последней. Полученные результаты применены в технике определения спектральной фазы на основе дисперсионного преобразования Фурье. Обсуждались высокая точность метода и возможность его применения как эффективной методики. Экспериментально определены спектральные фазы двухпиковых импульсов, сформированных из лазерного импульса длительностью 120 фс с известной спектральной фазой, и проведена оценка погрешности определения спектральной фазы и восстановления поля импульса.

1. Введение

С продолжающимся ускоренным развитием сверхбыстрой оптики необходимость измерения ультракоротких лазерных импульсов становится все важнее с каждым днем. Существующие методы в некоторых случаях успешно решают задачу определения мгновенной фазы и поля импульса. Однако многочисленные применения ультракоротких импульсов в настоящее время приводят к потребности в разработке более простой, работающей в реальном времени технике определения длительности и частотного чирпа импульса.

Известно, что чирп можно измерять, используя традиционные интерферометрические автокорреляционные измерения второго и третьего порядков. Для обеспечения высокой чувствительности и с целью более точных измерений в работе [1] предложили модифицированную спектральную автоинтерферометрическую технику. Конечно, данная техника более проста в применении по сравнению с итерационными методами определения фазы и не требует дополнительного оборудования, однако профиль импульса очень чувствителен к частотному чирпу и его измерение требует более тонкой техники. С момента генерации ультракоротких импульсов (около 30 лет) предлагалось и демонстрировалось множество методов, однако самой результативной, работающей на сегодняшний

день остается предложенная в 1991 г. группой ученых под руководством Р. Требино FROG-техника в различных современных переработанных и модифицированных вариантах [2]. В частности, эта техника позволяет однозначно определять изменения от импульса к импульсу в пучке: наличие нестабильности профиля и длительности импульсов. Примечательна также продемонстрированная в работе [3] простая волноводная техника, основанная только лишь на численной обработке двух спектров: начального импульса и подвергнувшегося самомодуляции в световоде. Однако отмеченные техники являются непрямыми и требуют итерационных вычислений, что и является их основным недостатком. Прямой техникой определения спектральной фазы считаются SPIDER [4], MIPPS [5], SRSI [6, 7] и др., каждая из которых имеет свою область применения, и вследствие этого они не могут считаться универсальными.

Нами предложена техника измерения спектральной фазы, основанная на дисперсионном преобразовании Фурье (ДПФ) с растяжением по времени [8], которое при дальнейшем применении самореферентным способом дало результаты, находящиеся в хорошем согласии с результатами численного моделирования [9]. В настоящей работе обсуждается точность предложенной нами техники, а также вклад ошибки при определении спектральной фазы в комплексное поле импульса.

2. Математическая модель

Для количественной оценки ошибки восстановления профиля импульса применялась следующая формула расчета среднейквadraticной ошибки разницы между реальным полем и восстановленным:

$$\varepsilon = \|E_0(t) - E(t)\| = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} |E_0(t) - E(t)|^2 dt \right]^{1/2}. \quad (1)$$

Согласно теореме Парсеваля (теорема Планшереля) для выявления вклада спектральной фазы, последняя представлена для Фурье-образов полей в следующем виде:

$$\varepsilon \equiv \frac{1}{2\pi} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} |\tilde{E}_0(\omega) - \tilde{E}(\omega)|^2 d\omega \right]^{1/2}. \quad (2)$$

Представив здесь шум спектральной фазы в виде $\varphi(\omega) = \varphi_0(\omega) + \delta\varphi(\omega)$ вариации (ошибки) фазы малыми отклонениями $\delta\varphi(\omega)$ с учетом первой степени приближения анализа ряда, для ε получаем

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} |\tilde{E}_0(\omega) \delta\varphi(\omega)|^2 d\omega \right]^{1/2}, \quad (3)$$

или, что тождественно, $\varepsilon = 1/2\pi \|\tilde{E}_0(\omega) \delta\varphi(\omega)\|$. То есть малое $\delta\varphi(\omega)$ ошибки фазы входит в погрешности характеристики поля в виде произведения с комплексной амплитудой. Это означает ее более весомый вклад в энергонесущую часть поля.

3. Численные исследования

В численных исследованиях рассматривались двухпиковые импульсы, имеющие гауссовское распределение. Электрическое поле представлено в виде $E(t) = A_1 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t+\tau_1}{\Delta t} \right)^2 \right] + A_2 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t+\tau_2}{\Delta t} \right)^2 \right]$, где A комплексная амплитуда,

t – временная координата, Δ – временная характеристика импульса которая на полувысоте связана с длительностью T импульса выражением $\Delta t \approx T/1.76$ [1], τ_1 и τ_2 – соответственно временные сдвиги.

Для определения влияния погрешности измерения спектральной фазы лазерного импульса на профиль восстановленного импульса были проведены следующие численные расчеты: формировались двухпиковые импульсы с различными параметрами, вычислялись Фурье-образы этих импульсов, после чего к спектральной фазе прибавлялся некоррелированный белый шум по следующей формуле: $\varphi(\omega) = \varphi_0(\omega) + \delta\varphi(\omega) = \varphi_0(\omega) + \sigma N$. Спектральный фазовый шум изменялся в пределах $(0 - \pi/8)$ значений σ , а N – принимало случайные значения, лежащие в пределах $(0-1)$. Рассматривались различные соотношения вершин (пиков) двухпиковых импульсов. Для сравнения с результатами экспериментальных исследований на рис.1 приведены результаты для соотношений 1:6 при значениях $\sigma = \pi/8$ и $\sigma = \pi/16$.

На рис.1. кривая 1 изображает спектральные фазы двухпиковых импульсов в отсутствие шума, а кривая 2 – содержащие шум. Рисунки отображают полученные результаты для соотношения пиков двухпикового импульса 1:6 при значениях спектральной фазы $\pi/16$ (рис.1а) и $\pi/8$ (рис.1б), соответственно.

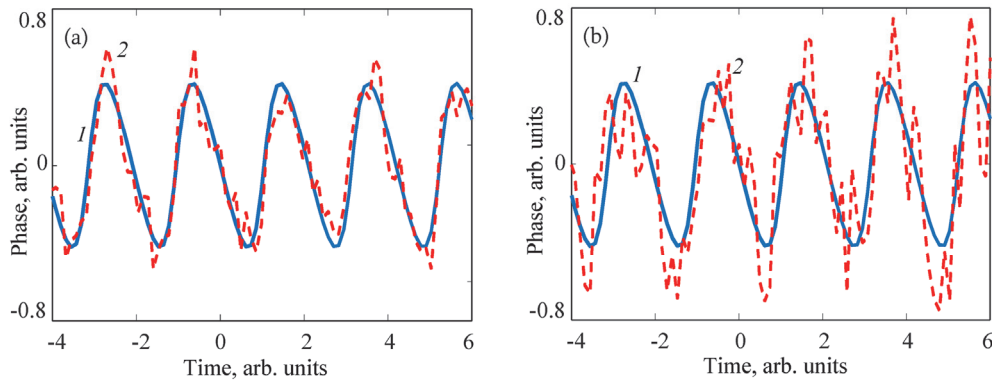


Рис.1. Сравнение спектральных фаз двухпиковых импульсов в отсутствие (кривая 1) и при наличии (кривая 2) шума при соотношении пиков 1:6 для значений (а) $\sigma = \pi/16$ и (б) $\sigma = \pi/8$.

Выполнено также восстановление импульса, имеющего шумовую составляющую в спектральной фазе (рис.2), и для количественного анализа численно определены среднеквадратичные отклонения с применением формулы (3).

Как и ожидалось, отличия в профиле импульсов, несущих в спектральной фазе шумовую составляющую, и без ее наличия растут параллельно увеличению шума. В изображенных на рис.2 результатах при амплитудных значениях шумовых составляющих $\sigma = \pi/16$ и $\sigma = \pi/8$ для данных $\delta\varphi(\omega)$ спектральных фаз двухпиковых импульсов отклонение восстановленного импульса от начального заметно в энергонесущей части импульса, а среднеквадратичные отклонения – значения ε – равны 0.04 и 0.09, соответственно.

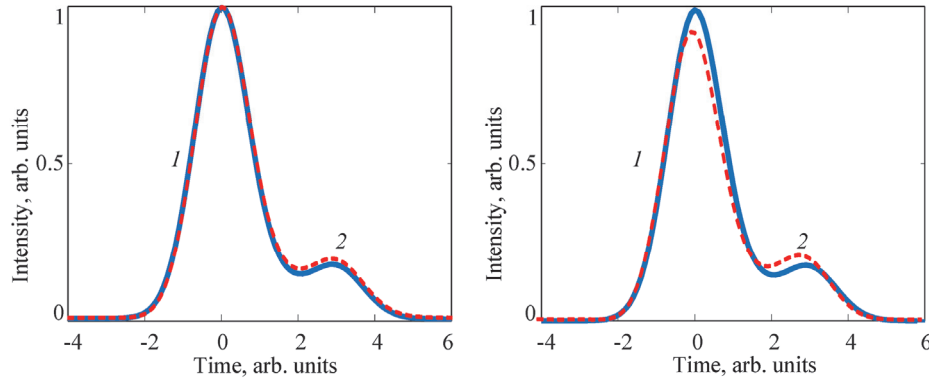


Рис.2. Сравнение начальных (кривая 1) и восстановленных (кривая 2) импульсов при соотношениях пиков 1:6 для значений шума спектральной фазы (a) $\sigma = \pi/16$ и (b) $\sigma = \pi/8$.

4. Метод определения спектральной фазы на основе ДПФ

В технике определения спектральной фазы, основанной на ДПФ, спектральная фаза ультракороткого импульса измеряется на основе подобия спектральной фазы исследуемого импульса и временной фазы спектра, сформированного из исследуемого импульса в дальнем поле дисперсии. Известно, что в дальнем поле дисперсии, когда удлинение импульса имеет большое значение $-\Delta t/\Delta t_0 \gg 1$, импульс повторяет форму своего спектра. В наших предыдущих работах, где изучались начальные импульсы с различными амплитудными и фазовыми профилями (колоколообразные, многопиковые, синусоидально-модулированные, со спектрорасширением вследствие фазовой самомодуляции), было показано, что в процессе формирования спектра имеет место воспроизводство спектрального поля импульса во временной области, или ДПФ для всего комплексного поля, и временная фаза спектра воспроизводит первоначальную спектральную фазу с дополнительной параболической составляющей [8, 9].

Нами приводятся результаты экспериментальной реализации этого принципа при изучении процесса формирования спектра для двухпиковых и трехпиковых импульсов, особенно интересных из-за сложного функционального вида их спектральной фазы. Предложенная нами техника измерения спектральной фазы импульса, опираясь на отмеченную особенность формирования спектра, измеряет последнюю с помощью неколлинеарной генерации суммарной частоты (ГСЧ). В частности, лазерным импульсом сканируется сформированный спектр, при этом между ними создаётся временная задержка, и записывается спектр ГСЧ-сигнала в позициях последовательных временных задержек. Зависимость длины центральной волны ГСЧ-спектра от временной задержки представляет собой временной чирп спектра, который состоит из двух частей: первичного неизвестного чирпа и линейного чирпа, который приобретает из-за дисперсии групповых скоростей. В численных расчетах, удаляя эту линейную составляющую записанного чирпа, получаем «спектральный чирп» импульса и, используя всего одно действие интегрирования, имеем спектральную фазу импульса. Эта методика измерения спектральной фазы, будучи основанной на

спектральных записях, свободна от итерационных расчетов и, следовательно, ошибочность метода связана только с записью ГСЧ-спектра и определением длины его центральной волны. Погрешность измерения больше в слабых энергетических областях – на крыльях импульса. А в пиковых областях связана только лишь с разрешением записи спектрометра. В проведенных нами исследованиях разрешение равно 0.05 нм. При спектральной ширине в 10 нм относительная ошибка составляет 0.005 (использовался оптический спектральный анализатор Optical Spectrum Analyzer OSA Ando AQ 6315). Следовательно, можно утверждать, что в энергонесущей части относительная погрешность метода близка к полпроцента. В крыльях импульса, согласно формуле (3) теоретического анализа, ошибка (ϵ) записи входит как произведение амплитуды и $\delta\varphi(\omega)$, что предполагает, что в крыльях, вследствие малости энергии, вклад ошибки также будет мал. Показ данного утверждения результатами численного моделирования, приведенными выше, обосновал точность наших экспериментальных результатов, которые были получены при тех же условиях, что и для численного моделирования.

5. Эксперимент

Экспериментальная установка состоит из фемтосекундного титан-сапфирового лазера (Coherent Verdi10-Mira 900F) с центральной длиной волны 800 нм, длительностью импульса 120 фс, средней мощностью 1.2 Вт и частотой повторения импульсов 76 МГц; дисперсионной линии задержки (ДЛЗ); автокоррелятора, оптического спектроанализатора (Ando AQ6315), формирователя импульса и микрометрического столика [8, 9]. ДЛЗ состоит из пары дифракционных решеток и отражающего зеркала. Сначала лазерный импульс с помощью полупрозрачного зеркала разделяется на две составляющие. Из одной составляющей формируется исследуемый импульс, который, проходя затем через ДЛЗ, преобразуется в спектр, а другая составляющая проходит через пару находящихся на микрометрическом столике зеркал и используется в качестве сканирующего сигнала. Затем оба пучка фокусируются на кристалл Beta Barium Borate (BBO) толщиной 0.2 мм с целью получения генерации суммарной частоты. Записи спектров сигнала с суммарной частотой для случаев различных временных задержек между сигналами дают зависимость текущей частоты спектра от этих временных задержек. Полученная зависимость представляет собой сумму двух чирпов: начального исследуемого импульса и приобретенного в ДЛЗ. Удаляя линейную составляющую, получаем спектральный чирп исследуемого импульса, при интегрировании которого получим спектральную фазу. На рис.3 представлено сравнение результатов экспериментальных исследований с полученными при численных расчетах.

Сравнение спектральных фаз, определяемых из записанного в эксперименте чирпа, с соответствующими расчетными кривыми показывает, что в центральной, энергонесущей части импульса записи достаточно точны и совпадают с расчетными кривыми. Отклонения, в основном, проявляются в крыльях импульса, что соответствует ранее сделанным выводам.

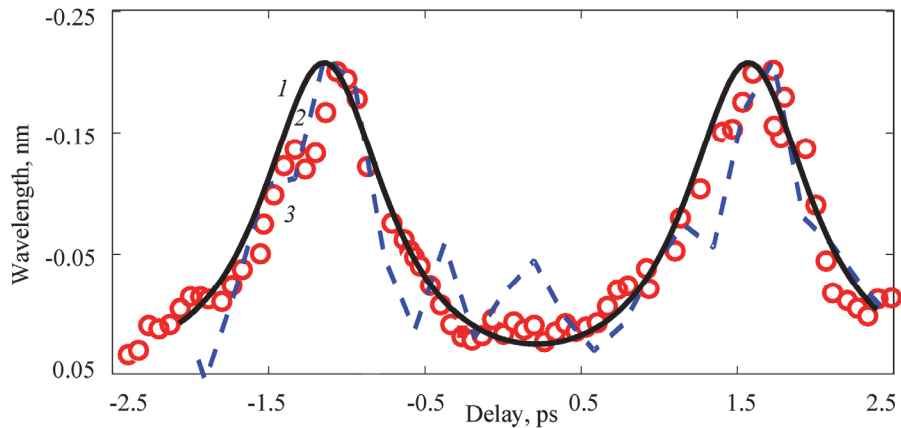


Рис.3. Сравнение расчетных кривых спектральных фаз двухпикового импульса без учета (кривая 1) и с учетом шума (кривая 2) с экспериментальными результатами (кривая 3) при соотношении пиков импульса 1:6.

6. Заключение

На основе теоретического анализа и численного моделирования проанализировано влияние шумовой составляющей в спектральной фазе ультракороткого импульса на восстановление профиля импульса. С применением аддитивного белого шума получена погрешность для восстановленного поля 4 и 9% при 3 и 6% спектрального фазового шума, соответственно. Показано также, что ошибки спектрального поля и временного поля равны, следовательно, расчет ошибок спектральных и временных полей равнозначен расчету ошибок интенсивности и фазы. А также показано, что погрешность восстановления поля становится пропорциональна произведению ошибок амплитуды и фазы при малых значениях последней. Полученные результаты применены для оценки погрешности восстановления импульса в технике определения спектральной фазы, основанной на дисперсионном Фурье-преобразовании. Показано, что ошибка измерения chirp при применении этой техники может быть значительной лишь в областях низких интенсивностей, т.е. в крыльях импульса вследствие большого соотношения поле – шум. Эффективность метода доказана исследованием известных импульсов. Экспериментально определены спектральные фазы двухпиковых импульсов с различными соотношениями пиков, сформированных из спектрально-ограниченных импульсов с длительностью 120 фс, и проведена оценка погрешности предлагаемого метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. D.A. Bender, M.P. Hasselbeck, M. Sheik-Bahae. Opt. Lett., **31**, 1 (2006).
2. R. Trebino, R. Jafari, S.A. Akturk, P. Bowlan, Z. Guang, P. Zhu, E. Escoto, G. Steinmeyer. Appl. Phys., **128**, 171103 (2020).
3. E.A. Anashkina, A.V. Andrianov, M.Y. Koptev, A.V. Kim. Reports on Progress in Physics, **78**, 113901 (2015).
4. C. Iaconis, I.A. Walmsey. Opt. Lett., **23**, 10 (1998).

5. V.V. Lozovoy, I. Pastirk, M. Dantus. Opt. Lett., **29**, 7 (2004).
6. T. Oksenhendler, S. Coudreau, N. Forget, V. Crozatier, S. Grabielle, R. Herzog, O. Gobert, D. Kaplan. Appl. Phys. B, **99**, 7 (2010).
7. J. Zhu, X. Shen, L. Lin, Z. Si, J. Liu. Rev. Sci. Instrum., **89**, 083109 (2018).
8. M. Sukiasyan, N. Karapetyan, H. Toneyan, A. Kutuzyan, L. Mouradian. Appl. Opt., **58**, 2817 (2019).
9. M. Sukiasyan, A. Kutuzyan. Frontiers in Optics + Laser Science, Technical Digest, LW7G.1, USA, (2020).

ԱՂՄՈՒԿԱՅԻՆ ՍՊԵԿՏՐԱԼ ՓՈԽԼԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԳԵՐԿԱՐՃ ԻՄՊՈՒԼՍԻ ՏԵՍՔԻ ՎՐԱ

Վ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Մ. ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ, Ա. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ,
Ա. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ, Ա. ԿՈՒՏՈՒԶՅԱՆ

Հիմնվելով թվային և էքսպերիմենտալ հետազոտությունների վրա, վերլուծվել է գերկարճ իմպուլսի սպեկտրալ փուլի որոշման մեջ աղմուկային բաղադրիչի ազդեցությունը իմպուլսի տեսքի վերականգնման խնդիրներում: Դիտարկվել է ադիտիվ, սպիտակ աղմուկ, ցույց է տրվել, որ դաշտի վերականգնման սխալանքը համեմատական է դառնում սպեկտրալ ամպլիտուդի և փուլի սխալի արտադրյալին, երբ այն փոքր մեծություն է: Ստացված արդյունքները կիրառվել են դիսպերսիոն ֆուրիե փոխակերպման վրա հիմնված սպեկտրալ փուլի որոշման տեխնիկայում: Քննարկվել են մեթոդի բարձր ճշգրտության և որպես արդյունավետ տեխնիկա կիրառելու հնարավորությունը: Էքսպերիմենտալ որոշվել է 120 ֆվ սևողությամբ լազերային իմպուլսից ձևավորված, հայտնի սպեկտրալ փուլ ունեցող, երկգագաթ իմպուլսների սպեկտրալ փուլերը և կատարվել սխալանքի գնահատում:

IMPACT OF SPECTRAL PHASE NOISE DISTORTIONS ON THE ULTRASHORT PULSE PROFILE

V. AVETISYAN, M. SUKIASYAN, A. AVETISYAN,
A. KIRAKOSYAN, A. KUTUZYAN

An analysis of the influence of the noise component on determining the spectral phase of an ultrashort pulse in pulse profile reconstruction task was conducted based on numerical and experimental studies. Additive and white noises were considered, and it was shown that the reconstruction error of the field becomes proportional to the product of the spectral amplitude and the error in determining the spectral phase at small values of the latter. The obtained results were applied in the technique of determining the spectral phase based on Fourier dispersion transformation. The high accuracy of the method and the possibility of its application as an effective technique were discussed. The spectral phases of two-peak pulses formed from a laser pulse with a duration of 120 fs with a known spectral phase were experimentally determined, and an assessment of the error in determining the spectral phase and the reconstruction of the pulse field was conducted.