

УДК 621.373

СПЕКТРАЛЬНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОГИБАЮЩЕЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

К.А. ПАЛАНДЖЯН, Т.Г. МАНСУРЯН, Г.Л. ЕСАЯН, Л.Х. МУРАДЯН

Ереванский государственный университет, Армения

(Поступила в редакцию 17 июня 2008 г.)

Предложен новый спектрально-интерферометрический метод полной характеристики сверхкоротких импульсов. Метод основан на использовании, в качестве опорного, субпараболического импульса с известной фазой, сформированного из исследуемого в одномодовом волокне. Предлагаемый метод экспериментально апробирован для фемтосекундных импульсов. Восстановлены начальные фазы и временные профили интенсивности исследуемых импульсов.

1. Введение

Все возрастающее использование пикосекундных и фемтосекундных лазерных систем в самых различных областях науки вызывает необходимость разработки методов характеристики ультракоротких импульсов. При этом, в зависимости от решаемой задачи, важное значение имеет как определение временной огибающей импульса, так и его фазы. В последние годы предложен целый ряд методов полной характеристики ультракоротких импульсов. Методы FROG [1] и GRENOUILLE [2] на основе спектральных и корреляционных измерений с помощью итеративного алгоритма позволяют восстановить временные амплитуду и фазу импульса. Метод спектрально-временного отображения STI [3,4] позволяет прямую регистрацию длительности и временной формы импульса путем отображения временной информации в спектральную область. Предложен также ряд методов, основанных на спектральной интерферометрии, которая была использована для измерения фазы ультракоротких импульсов в [5-7]. В наи-более известных методах SPIDER [8], SPIRIT [9,10] и SORBETS [11] при помощи спектральной интерференции между двумя частотно-сдвинутыми репликами исследуемого импульса восстанавливается его спектральная фаза, что вместе с измеряемым спектром дает возможность полностью характеризовать импульс. В работах [12-15] представлены спектрометрические методы измерения спектральной фазы УКИ, основанные на измерении двумерной пространственно-спектральной интерференционной картины. По сравнению с традиционными методами спектральной интерферометрии, двумерная кодировка спектральной фазы позволяет существенно увеличить спектральное разрешение. Общим недостатком

перечисленных методов является сложность экспериментальной реализации или дороговизна коммерчески выпускаемых приборов (на основе FROG и SPIDER).

В настоящей работе предлагается новый простой метод полной характеристики параметров фемтосекундных и субпикосекундных импульсов. Он основан на том, что при распространении произвольных мощных ультракоротких импульсов в одномодовом волокне формируются субпараболические импульсы с линейным чирпом (квадратичной фазой), который определяется только дисперсионными характеристиками волокна и не зависит от чирпа и интенсивности начального импульса [16-20]. Это позволяет использовать данный субпараболический импульс в качестве опорного импульса в спектральной интерферометрии.

Реализация предлагаемого метода состоит в том, что исследуемый импульс разделяется на две реплики, одна из которых, проходя через волокно, преобразуется в субпараболический импульс. Далее этот импульс, используемый в качестве опорного, накладывается на другую (сигнальную) реплику и измеряется полученный таким образом суммарный интерференционный спектр. Полученная спектральная картина зависит от разности спектральных фаз опорного и сигнального импульсов. Это позволяет, зная дисперсионные характеристики исследуемого волокна, а, следовательно, и фазу опорного субпараболического импульса, восстановить спектральную фазу сигнального (начального) импульса. Отдельное измерение спектра сигнального импульса вместе с восстановленной спектральной фазой полностью характеризует исследуемый импульс как в спектральной, так и во временной областях. Следует отметить, что в отличие от [1,8,9], где спектральная интерференция происходит между двумя частотосдвинутыми репликами исследуемого импульса, получение которых является технически непростой задачей, в предлагаемом методе опорный импульс с известными характеристиками практически получается из реплики исследуемого импульса просто после прохождения волокна с длиной порядка 1 м.

Схематически экспериментальная реализация метода представлена на рис.1. Исследуемый импульс с амплитудой в спектральном представлении $A_0(\omega)$ и спектральной фазой ϕ подается на вход интерферометра Маха–Цендера, одно плечо которого содержит оптическое волокно. На выходе из волокна для амплитуды и фазы импульса имеем, соответственно, $A_f(\omega)$ и $\phi_f(\omega)$. Линия задержки в другом плече служит для выравнивания оптических путей в плечах интерферометра и не меняет параметров начального импульса. Получающаяся на выходе интерферометра спектральная картина регистрируется при помощи спектрометра и имеет вид

$$S(\omega) = S_0(\omega) + S_f(\omega) + 2\sqrt{S_0(\omega)S_f(\omega)} \cos[\phi_f(\omega) - \phi_0(\omega)], \quad (1)$$

где $S(\omega) = |A(\omega)|^2$ – соответствующие спектры. Отсюда, зная $S_0(\omega)$ и $S_f(\omega)$, можно определить разность фаз. При малых интенсивностях начального импульса, когда нелинейными эффектами в волокне можно пренебречь, получаем

$$\Delta\phi(\omega) = -\frac{1}{2}k_2 f \omega^2, \quad (2)$$

где k_2 – коэффициент дисперсии второго порядка, f – длина волокна. В этом случае $\Delta\phi(\omega)$ зависит только от дисперсионных свойств волокна.

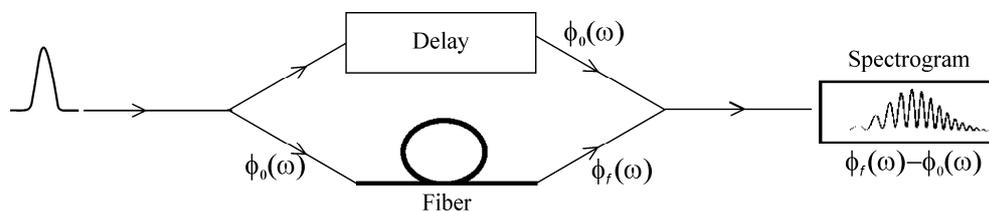


Рис.1. Принципиальная схема эксперимента

При увеличении интенсивности импульса совместное воздействие фазовой самомодуляции и дисперсии приводит к тому, что в таком волокне из импульсов с произвольной начальной формой формируются субпараболические импульсы, временная огибающая и спектр которых в центральной энергонесущей части имеют форму, близкую к параболической. При этом, как показывают численные и экспериментальные исследования [16], спектральная фаза конечного импульса

$$\phi_f(\omega) \approx -\frac{1}{2}k_2 f \omega^2 \quad (3)$$

имеет параболический вид и практически не зависит от начального чирпа и интенсивности импульса [16]. Следует отметить, что, как показано в работе [16], спектральная фаза субпараболического импульса имеет вид (3) при мощностях 100 мВт, что для импульсов с длительностью ~ 100 фс соответствует спектральному уширению в 5-6 раз. В этом случае спектральная картина представляет из себя уширенный вследствие фазовой самомодуляции в волокне спектр опорного импульса, в середине которого наблюдаются интерференционные полосы, обусловленные разностью фаз $\Delta\phi(\omega) = \phi_f(\omega) - \phi_0(\omega)$. Тогда из формулы (1) с учетом (3) можно восстановить спектральную фазу начального импульса $\phi_0(\omega)$, которая вместе с измеренным спектром $S_0(\omega)$ полностью характеризует исследуемый импульс. Временную огибающую и фазу импульса при этом можно получить путем обычного фурье-преобразования.

3. Эксперимент

Для экспериментальной демонстрации предложенного метода использовалось излучение титан-сапфирового лазера (Verdi10+Mira900) с длительностью импульса на полувысоте ~ 150 фс, средней мощностью 1.6 Вт и частотой 76 МГц. Импульсы были практически спектрально-ограниченными с шириной спектра ~ 7.3 нм.

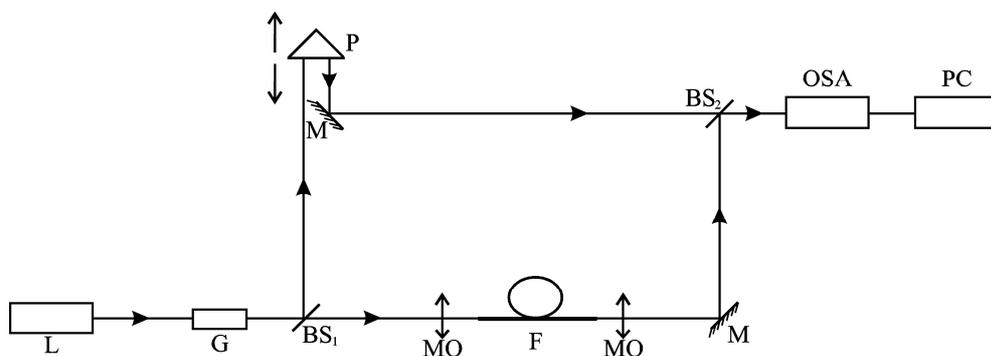


Рис.2. Схема экспериментальной установки. L – лазер, G – стекло, BS₁ и BS₂ – полупрозрачные зеркала, P – призма, M – зеркало, MO – микрообъективы, F – одномодовое оптическое волокно, OSA – оптический спектральный анализатор, PS – компьютер.

Излучение лазера проходило через стекло G (рис.2), в результате чего получало начальную фазу $\phi_0(\omega)$, которая в дальнейшем определялась описанным выше методом. Для этого импульс с помощью полупрозрачного зеркала BS₁ разделялся на 2 реплики. Сигнальный импульс проходил через свободное плечо, длина которого для выравнивания оптических путей и получения интерференционной картины на выходе интерферометра регулировалась смещением призмы P. Опорный импульс, проходя через второе плечо, при помощи микрообъективов MO вводился в одномодовое оптическое волокно длиной 2.1 мс с центральной частотой 633 нм (F). В волокне в результате совместного воздействия фазовой самомодуляции и дисперсии из начального импульса с фазой $\phi_0(\omega)$ формировался субпараболический импульс с известной параболической фазой $\phi_f(\omega)$. Этот импульс, используемый в качестве опорного, накладывался на сигнальный импульс с помощью второго полупрозрачного зеркала BS₂ и полученная спектральная интерференционная картина регистрировалась оптическим спектральным анализатором (OSA) и далее численно обрабатывалась с помощью компьютера (PC). Спектр импульса, прошедшего через волокно, уширяется, а спектр сигнального импульса остается неизменным, поэтому интерференционные полосы будут наблюдаться только в центральной части субпараболического импульса. На рис.3а сплошной линией изображена центральная часть типичного измеряемого интерференционного спектра. Пунктирная линия представляет из себя тот же спектр, который для устранения шумов сглажен при помощи низкочастотного фильтра. С учетом того, что фаза соседних экстремумов отличается на π , можно с точностью до постоянной восстановить разность спектральных фаз $\Delta\phi(\omega) = \phi_f(\omega) - \phi_0(\omega)$. На рис.3b приведена восстановленная фаза, где кружки означают экспериментальные данные, а линия – это аппроксимационная парабола. Далее, используя измеренные спектр и спектральную фазу импульса, с помощью фурье-преобразования восстанавливались временные формы импульсов.

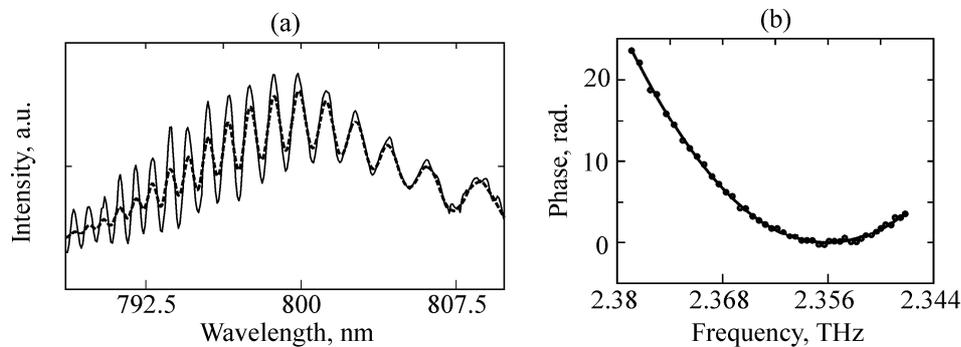


Рис.3. Зарегистрированный и сглаженный интерференционные спектры (а) и восстановленная спектральная фаза (б). Точки соответствуют максимумам и минимумам интерференционной картины, а линия – аппроксимационной параболы.

В эксперименте для придания импульсу начальной фазы $\phi_0(\omega)$ использовались стекла G разной толщины с известным (независимо измеряемым) коэффициентом k_2 . На рис.4 показаны восстановленные импульсы для двух случаев, когда использовались стекла с толщинами 8.5 см (1) и 19.5 см (2), которые приводили к расчетному удлинению импульса, соответственно, в ≈ 1.4 и в ≈ 2.4 раза. При этом интенсивность нормирована на интенсивность имеющего такой же спектр спектрально-ограниченного (неудлиненного) импульса и по пиковым значениям интенсивности можно видеть, насколько он удлинился. Полученные результаты, как видно из рисунка, достаточно хорошо совпали с ожидаемыми степенями удлинения импульсов.

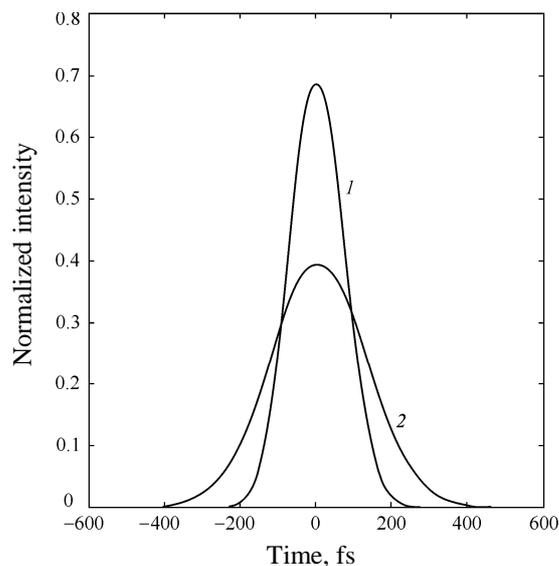


Рис.4. Восстановленные импульсы для случаев, когда использовались стекла с толщинами 8.5 см (1) и 19.5 см (2).

Предлагаемый метод, так же, как и другие методы, основанные на спектральной интерферометрии, применим для сравнительно коротких

импульсов, поскольку при больших длительностях получаются очень узкие спектры, и регистрация подобных спектров ограничивается спектральным разрешением спектрометра. Известно, что подобные методы позволяют регистрировать импульсы не длиннее нескольких пикосекунд. В работе [15] показано, что спектральное разрешение можно увеличить путем наложения опорного и сигнального импульсов друг на друга под малым углом. Это позволило регистрировать импульсы длительностью до 14 пикосекунд.

С другой стороны, следует также отметить, что для импульсов короче 50 фс нужно учесть, что при формировании опорного субпараболического импульса могут играть роль не только дисперсия второго порядка и фазовая самомодуляция, но и дисперсионные и нелинейные эффекты высших порядков [21]. Учет этих факторов нуждается в дальнейшем исследовании.

4. Заключение

Таким образом, предложен и экспериментально апробирован новый простой метод полной характеристики фемтосекундных импульсов. В методе, основанном на спектральной интерферометрии, из одной части импульса, под воздействием фазовой самомодуляции и дисперсии, в волокне формируется опорный субпараболический импульс, спектральная фаза которого не зависит от начального chirpa импульса и определяется только дисперсионными характеристиками волокна.

Работа выполнена в рамках проекта NATO SFP 978027.

ЛИТЕРАТУРА

1. **D.J.Kane, R.Trebino.** IEEE J. Quantum Electron., **29**, 571 (1993).
2. **S.Akturk, M.Kimmel, P.O'Shea, R.Trebino.** Opt. Express, **11**, 68 (2003).
3. **L.Mouradian, F.Louradour,** et al. IEEE J. Quant. Electron., **36**, 795 (2000).
4. **T.Mansuryan, A.Zeytunyan, M.Kalashyan, G.Yesayan, L.Mouradian, F.Louradour, A.Barthիլիմյ.** JOSA B, **25**, A101 (2008).
5. **C.Froehly, A.Lacourt, J.C.Vienot.** J. Opt. (Paris), **4**, 183 (1973).
6. **D.N.Fittinghoff, J.L.Bowie,** et al.. Opt. Lett., **21**, 884 (1996).
7. **L.Lepetit, G.Chիրіаux, M.Joffre.** J. Opt. Soc. Am. B, **12**, 2467 (1995).
8. **C.Iaconis, I.A. Walmsley.** Optics Letters, **23**, 792 (1998).
9. **V.Messenger, F.Louradour, C.Froehly, A.Barthelemy.** Optics Letters, **28**, 743 (2003).
10. **M.Lelek, F.Louradour,** et al.. JOSA B, **25/6**, A17 (2008).
11. **P.Kockaert, M.Haelterman, Ph.Emplit, C.Froehly.** IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **10**, 206 (2004).
12. **E.M.Kosik, A.S.Radunsky, I.A.Walmsley, C.Dorrer.** Opt. Lett., **30**, 326 (2005).
13. **A.S.Wyatt, I.A.Walmsley, G.Stibenz, G.Steinmeyer.** Opt. Lett., **31**, 1914 (2006).
14. **J.R.Birge, R.Ell, F.X.Kartner.** Opt. Lett., **31**, 2063 (2006).
15. **P.Bowlan, P.Gabolde, A.Shreenath, K.McGresham, R.Trebino.** Opt. Express, **24**, 11892 (2006).
16. **Г.Л.Есаян, К.А.Паланджян, Т.Г.Мансурян, А.С.Зейтунян, Л.Х.Мурадян.** Изв. НАН Армении, Физика, **43**, 35 (2008).

17. **G.Yesayan, K.Palanjyan, T.Mansuryan, A.Zeytunyan, L.Mouradian, P.Kockaert, Ph.Emplit**, in Nonlinear Photonics, OSA Technical Digest (CD), JWA18 (2007).
18. **P.Kockaert, L.Mouradian, G.Yesayan, Ph.Emplit**, in Proc. of Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2007, p.39.
19. **A.Zeytunyan, T.Mansuryan, K.Palanjyan, G.Yesayan, L.Mouradian, P.Kockaert, Ph.Emplit, F.Louradour, A.Barthիլիմյ**. Book of Abstracts of OSA Young Optician School (YOS-2007), Yerevan, 2007, p.53
20. **Г.Л.Есаян, К.А.Паланджян, Т.Г.Мансурян, А.С.Зейтунян, М.А.Калашян, А.А. Кутузян, Л.Х.Мурадян**. Proc. Conf. "Laser Physics-2006", Ashtarak, Armenia, 2007, p.193.
21. **G.P.Agrawal**. Nonlinear Fiber Optics. San-Diego, Boston, New York, London, Sidney, Toronto. Academic press, 1995.

**ՖԵՄՏՈՎԱՅՐԿՅԱՆԱՅԻՆ ԻՄՊՈՒԼՍՆԵՐԻ ՊԱՐՈՒՐԻՉԻ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆՄԱՆ
ՄՊԵԿՏՐԱԼ-ԻՆՏԵՐՖԵՐԱԶՈՓՈԿԱՆ ՄԵԹՈԴ**

Ք.Հ. ՓԱԼԱՆՋՅԱՆ, Տ.Գ. ՄԱՆՍՈՒՐՅԱՆ, Գ.Լ. ԵՍԱՅԱՆ, Լ.Խ. ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ

Առաջարկված է գերկարճ իմպուլսների լրիվ բնութագրման նոր սպեկտրալ ինտերֆերաչափական մեթոդ: Այն հիմնված է միամոդ ալիքատարում սկզբնական իմպուլսից ձևավորված հայտնի փուլով սուբ-պարաբոլային նեցուկային իմպուլսի օգտագործման վրա: Առաջարկված մեթոդը փորձնականորեն իրականացված է ֆեմտոպայրկյանային իմպուլսների համար: Վերականգնված են հետազոտվող իմպուլսների սկզբնական փուլերը և ինտենսիվության ժամանակային պրոֆիլները:

**SPECTRAL INTERFEROMETRIC METHOD FOR RETRIEVING
OF FEMTOSECOND PULSE ENVELOPE**

K.A. PALANJYAN, T.G. MANSURYAN, G.L. YESAYAN, L.KH. MOURADIAN

We proposed a new spectral-interferometric method for ultrashort pulse complete characterization. The method is based on the use of a reference sub-parabolic pulse with a known phase formed in a single-mode fiber from the input pulse replica. Proposed method is experimentally approved for femtosecond pulses. The phases and temporal profiles of tested pulses are retrieved.