

УДК 621.373

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СПЕКТРОНА: ФАЗОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Н. КАРАПЕТЯН^{1,2}, Г. ТОНЕЯН^{1,2*}, А. КУТУЗЯН¹, М. СУКИАСЯН^{1,2},
В. АВЕТИСЯН¹, Д. ГУЛКАНЯН¹, К. АПРЕСЯН¹, Л. МУРАДЯН^{1,2}

¹Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

²Институт синхротронных исследований КЕНДЛ, Ереван, Армения

*e-mail: h.toneyan@gmail.com

(Поступила в редакцию 14 декабря 2017 г.)

Исследованы фазовые особенности спектра с точки зрения дисперсионного Фурье-преобразования. Проведенный численный анализ для разных исходных импульсов с разными начальными спектральными фазами показал, что при формировании спектра может иметь место перенос информации из спектральной области во временную не только для амплитуды, но и для фазы поля излучения.

1. Введение

Спектроном называют импульс, временная огибающая интенсивности которого повторяет спектральный профиль. Спектрон формируется при распространении импульса в достаточно длинной дисперсионной среде [1,2] по временной аналогии с дифракцией в дальней зоне (фраунгоферовская дифракция). Формирование спектра исследовано в рамках метода дисперсионного Фурье-преобразования (ДФП) [2–5] или Фурье-преобразования в реальном времени [6–8]. Метод ДФП использует дисперсионный элемент и однопиксельный фотодиод для спектральных измерений в режиме реального времени, устраняя ограничения быстродействия традиционных спектрометров [8]. Этот метод имеет множество применений, таких как спектроскопия в реальном времени, быстрая оптическая визуализация, лазерное сканирование и т. п. Хотя процесс формирования спектра хорошо известен, фазовые особенности спектра подробно не изучены. Исследования фазовых особенностей спектра интересны, в частности, для определения спектральной фазы и последующей полной характеристики фемтосекундных импульсов. Информация о спектральной фазе вместе со спектральной амплитудой (спектром) позволяют восстановить комплексное поле излучения, т. е. временную интенсивность и фазу, методами спектральной

интерферометрии [9–12] и интерферометрии спектрального сдвига [9, 13].

Настоящая работа позволяет в качестве альтернативы к технически сложным методам [9–13] предложить определение фазы спектра на основе генерации суммарной частоты [14]. Целью настоящей работы является исследование фазовых особенностей спектра, в частности, поиск условий, при которых временная фаза спектра повторяет спектральную фазу.

2. Численные исследования

Комплексная медленно меняющаяся амплитуда импульса, удлиненного в «дальней зоне дисперсии» ($\zeta = z / L_D \gg 1$), математически описывается формулой

$$\Psi(\tau, \zeta) \approx \frac{1}{(i2\pi\zeta)^{1/2}} \exp\left(-\frac{i\tau^2}{2\zeta}\right) \tilde{\Psi}(\Omega, 0) \Big|_{\Omega=\tau/\zeta}, \quad (1)$$

где Ψ – медленно меняющаяся нормированная комплексная амплитуда и $\tilde{\Psi}$ – ее Фурье-образ, $\tau = (t - z / v_g) / \Delta t_0$ и Ω – безразмерное бегущее время и частота, соответственно, v_g – групповая скорость, $L_D = \Delta\tau^2 / k_2$ – характерная дисперсионная длина, $\Delta\tau_0$ – длительность начального спектрально-ограниченного импульса, z – длина среды и $\zeta = z / L_D$ ее нормированное значение [1, 2]. Асимптотическое уравнение (1) описывает временную амплитуду и фазу спектра:

$$|\Psi(\tau, \zeta)| \propto |\tilde{\Psi}(\Omega, 0)|_{\Omega=\tau/\zeta}, \quad (2)$$

$$\phi(\tau, \zeta) \approx \left[\varphi(\Omega, 0) - \Omega^2 \zeta / 2 \right]_{\Omega=\tau/\zeta}. \quad (3)$$

Таким образом, согласно уравнениям (2) и (3), временная огибающая интенсивности повторяет спектральную, а временная фаза – начальную спектральную фазу с точностью до параболической фазы, наведенной дисперсией: $\Omega^2 \zeta / 2 = \tau^2 (2\zeta)^{-1}$. На практике в качестве дисперсионной среды используются дисперсионные линии задержки на основе пары дисперсионных призм или дифракционных решеток [1], или же волоконные световоды при малых интенсивностях излучения, когда нелинейное самовоздействие импульса пренебрежимо мало.

Нами проведены численные исследования процесса формирования спектра для разных начальных импульсов. Численно решалось дисперсионное уравнение во втором приближении теории дисперсии (параболическое уравнение) с применением быстрого Фурье-преобразования [1]. Были сформированы двухпиковые и трехпиковые начальные импульсы посредством наложения гауссовских импульсов с разными амплитудами и временными задержками друг относительно друга. Результаты численного анализа соответствуют теоретическим предсказаниям: при $\zeta \gg 1$ временная огибающая интенсивности воспроизводит

спектральное распределение в соответствии с уравнением (2); условие формирования спектра, при этом, зависит от начальной формы спектра. Так, если из гауссовского и секанс-гиперболического импульсов спектры формируются на длинах дисперсионной среды $\zeta \sim 10$ (удлиняясь в ~ 10 раз), то из супер-гауссовского импульса 4-го порядка спектр формируется только на длинах $\zeta \sim 20$. Усложнение формы начального импульса сопровождается сужением энергонесущей части спектра и, таким образом, удлинением дисперсионной среды, требуемым для формирования спектра. Для двухпикового импульса с соотношением пиков 1:2 и временной задержкой между ними, равной двойной длительности составляющих гауссовских импульсов, спектр формируется на длине дисперсионной среды $\zeta = 60$ (рис.1).

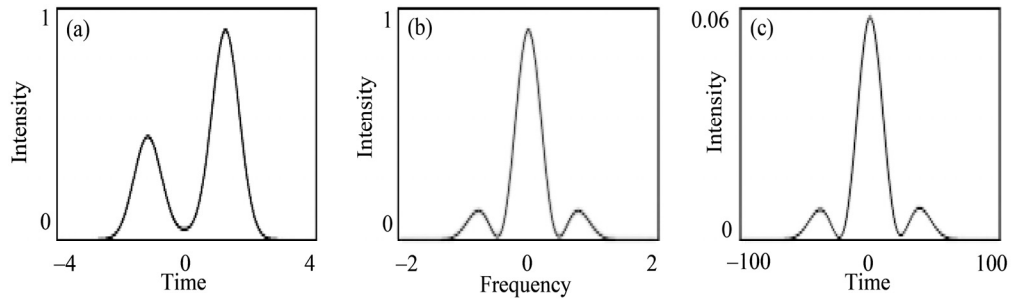


Рис.1. Спектр, сформированный из двухпикового импульса: (а) начальный импульс, (б) спектр и (с) спектр, сформированный на длине дисперсионной среды $\zeta = 60$.

Как показывает рис.2, для трехпикового импульса, состоящего из трех гауссовских импульсов с соотношением между пиками 1:2:4 и временной задержкой между ними, равной двойной длительности составляющих гауссовских импульсов, формирование спектра происходит на длине $\zeta = 100$.

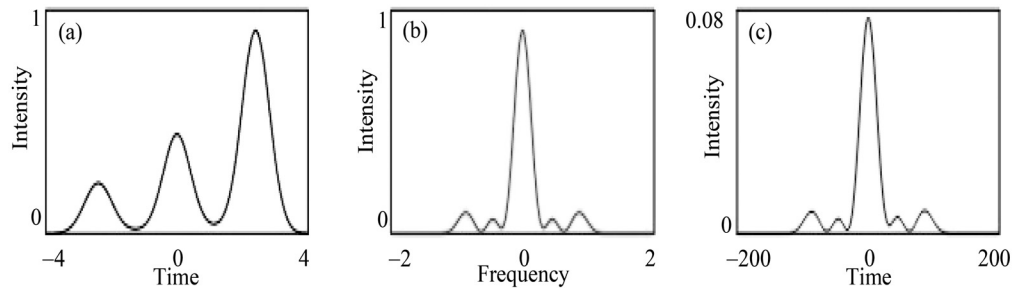


Рис.2. Спектр, сформированный из трехпикового импульса: (а) начальный импульс, (б) спектр и (с) спектр, сформированный на длине дисперсионной среды $\zeta = 100$.

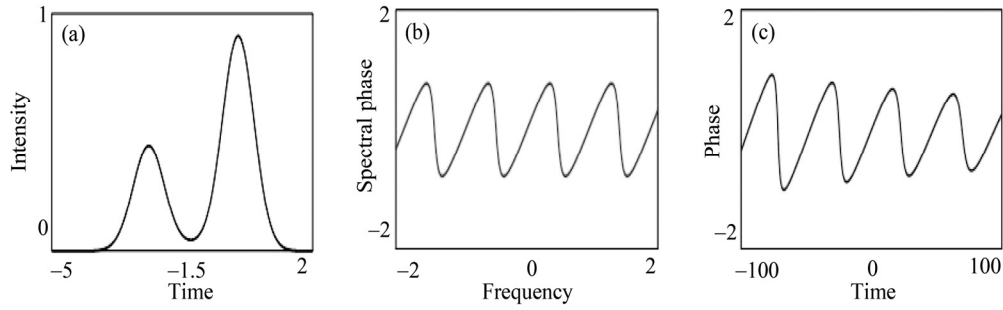


Рис.3. Фаза спектра для двухпикового импульса: (а) начальный импульс, (б) спектральная фаза и (с) временная фаза спектра, сформированного на длине дисперсионной среды $\zeta = 60$.

Далее, были численно исследованы условия, необходимые для воспроизведения спектральной фазы фазой спектра. Для наглядности сравнения спектральных фаз начальных импульсов с временными фазами спектров параболическая компонента фазы (уравнение (3)) удалена. На рис.3 и 4 показаны спектральные фазы двухпиковых и трехпиковых импульсов в сравнении с временными фазами спектров, сформированных из них на длинах дисперсионной среды $\zeta = 60$ и $\zeta = 100$. Результаты численного анализа показывают, что при формировании спектра не только импульс повторяет форму начального спектра, но также временная фаза (рис. 3с и рис.4с) повторяет форму начальной спектральной фазы (рис. 3б и рис.4б).

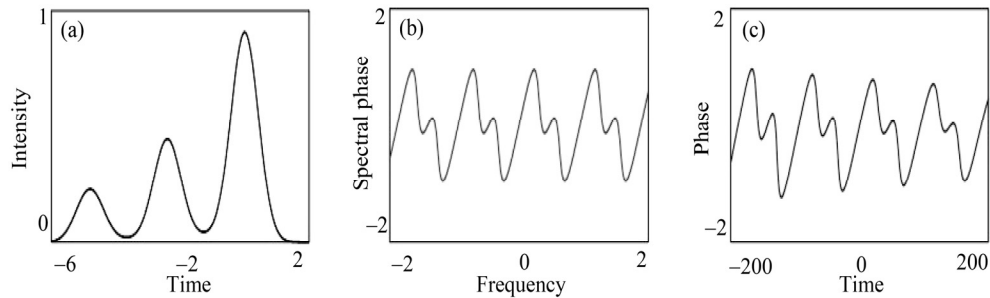


Рис.4. Фаза спектра для трехпикового импульса: (а) начальный импульс, (б) спектральная фаза и (с) временная фаза спектра, сформированного на длине дисперсионной среды $\zeta = 100$.

Были исследованы также особенности формирования спектра из импульсов с синусоидальными амплитудной модуляцией (АМ) и фазовой модуляцией (ФМ) спектра. Мы применяли синусоидальные АМ и ФМ к спектру гауссовского импульса по отдельности. АМ спектра с амплитудой σ_{amp} и периодом T задавалась уравнением

$$|\tilde{\Psi}(\Omega, 0)| = |\tilde{\Psi}_0(\Omega)| [1 + \sigma_{\text{amp}} \cos(T\Omega)],$$

а ФМ с амплитудой σ_{ph} и периодом T задавалась уравнением

$$\tilde{\Psi}(\Omega, 0) = \tilde{\Psi}_0(\Omega) \exp[i\sigma_{ph} \cos(T\Omega)].$$

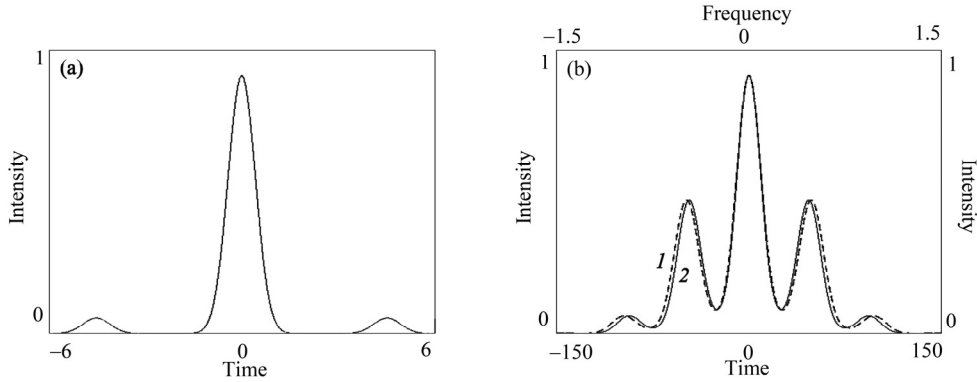


Рис.5. Формирование спектра из гауссовского импульса с синусоидальной АМ спектра: (а) начальный импульс, (б) спектр (1) на длине $\zeta_{amp} = 250$ и спектр (2).

На рис.5 представлен спектр гауссовского импульса с АМ, в сравнении с

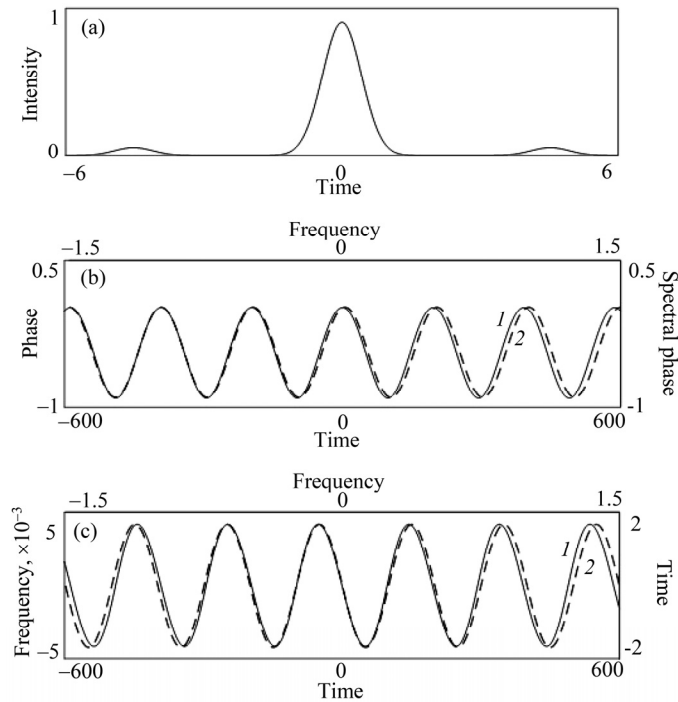


Рис.6. Формирование спектра из гауссовского импульса с синусоидальной ФМ спектра: (а) начальный импульс, (б) временная фаза спектра, сформированного на $\zeta_{ph} = 400$ (1) и начальная спектральная фаза (2), (с) чирп спектра (1) и производная исходной спектральной фазы (2).

сформированным из него спектром. Начальный импульс показан на рис.5а. Наименьшее значение ζ , требуемое для повторения амплитуды спектра, обозначено как ζ_{amp} . Кривая 1 на рис.5b относятся к спектру, сформированному из начального импульса с АМ ($\sigma_{\text{amp}} = 0.5$ и $T = 4\pi/\Delta\Omega$, $\Delta\Omega$ – ширина спектра), на длине $\zeta_{\text{amp}} = 250$. Кривая 2 на рис.5b отображает спектр с АМ.

Рис.6 иллюстрирует формирование спектра из гауссовского импульса с синусоидальной ФМ спектра. На рис.6b показана синусоидальная спектральная фаза (кривая 2) и временная фаза спектра (кривая 1), а также их производные (рис.6с). Наименьшее значение ζ , требуемое для повторения фазы спектра, обозначено через ζ_{ph} . Для сравнения ζ_{ph} с ζ_{amp} амплитуда и частота ФМ и АМ выбраны равными: $\sigma_{\text{ph}} = \sigma_{\text{amp}} = 0.5$ и $T = 4\pi/\Delta\Omega$. Согласно численным исследованиям, $\zeta_{\text{ph}} = 400$ для данных σ_{ph} и T . Таким образом, для повторения фаз требуются большие длины дисперсионной среды: $\zeta_{\text{ph}} > \zeta_{\text{amp}}$.

На рис.7а представлена зависимость ζ_{amp} от параметра σ_{amp} , а на рис.7b приведена зависимость ζ_{ph} от σ_{ph} . Как видно из рисунков, обе зависимости параболические и значения ζ_{ph} превосходят ζ_{amp} .

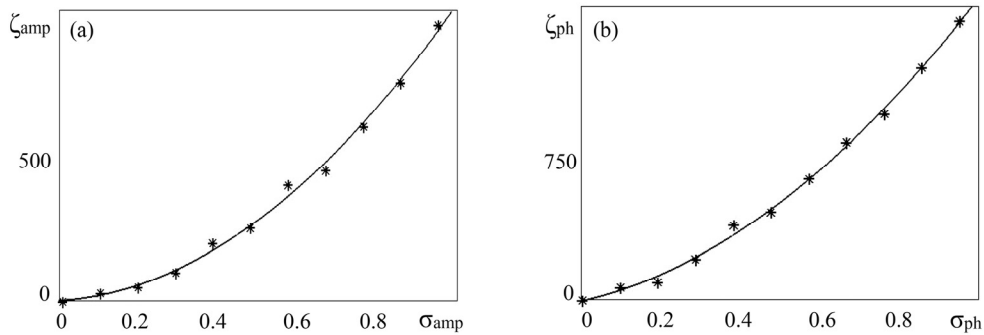


Рис.7. Зависимости минимальной длины дисперсионной среды ζ , необходимой для частотно-временного отображения, от (а) амплитуды спектральной модуляции σ_{amp} и (б) амплитуды фазовой модуляции σ_{ph} .

Было исследовано также формирование спектра из двухпикового импульса с фазовой самомодуляцией (ФСМ) при отношении пиков 1:10 и временной задержке $2.5\Delta t_0$. Численное моделирование процесса самовоздействия такого импульса в световоде проводилось на основе методики решения нелинейного уравнения Шрёдингера со следующими параметрами счета: $\zeta = 0.5$ и $R = 8$, где $R = L_D / L_{\text{NL}}$ – параметр нелинейности и L_{NL} – характерная длина нелинейного самовоздействия [1]. Форма импульса на выходе из световода изображена на рис.8а. При таких условиях ($\zeta = 0.5$ и $R = 8$) спектр расширяется в два раза. Световод выбран коротким во избежание дисперсионного расплывания импульса, а длина последующей дисперсионной среды ζ выбрана достаточно большой в соответствии с требованиями дальней зоны дисперсии. На рис.8b

изображен спектр (кривая 2), сформированный из ФСМ-импульса в дисперсионной среде длиной $\zeta = 70$, в сравнении со спектром (кривая 1). Фаза и чирп спектра (рис.8с,d кривые 1) сравниваются с начальной спектральной фазой и её производной (рис.8с,d кривые 2). Фаза содержит дополнительную параболическую составляющую из-за «побочной» дисперсии в световоде. Результаты численного эксперимента свидетельствуют о частотно-временном отображении спектра не только для амплитуды, но и для фазы импульса.

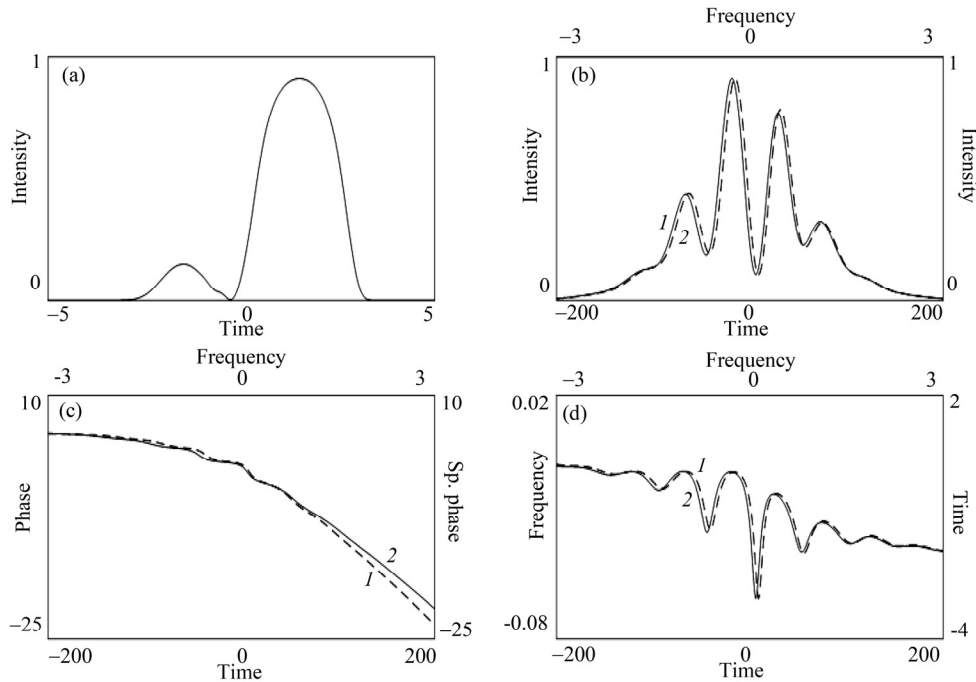


Рис.8. Формирование спектра из импульсов с ФСМ: (а) начальный импульс, (б) спектр (1) и спектр (2), сформированный на длине дисперсионной среды $\zeta = 70$, (с) начальная спектральная фаза (1) и временная фаза спектра (2), (д) производная начальной спектральной фазы (1) и чирп спектра (2).

3. Заключение

Исследовано формирование спектра из различных начальных импульсов с точки зрения фазовых особенностей процесса. Исследуя двухпиковые и трехпиковые импульсы, а также импульсы с начальной синусоидальной спектральной фазой и начальной ФСМ, мы показали, что при определенных условиях временная фаза спектра повторяет начальную фазу спектра. Для импульсов с синусоидальной АМ или ФМ спектров длина дисперсионной среды, необходимая для повторения фаз, больше, чем требуется для формирования спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.А. Ахманов, В.А. Выслоух, А.С. Чиркин. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. Москва, Наука, 1988.
2. L. Mouradian, A. Barthelemy. Shaping Light in Nonlinear Optical Fibers, Chapter 6. New York, Wiley, 2017.
3. P.V. Kelkar, F. Coppinger, A.S. Bhushan, B. Jalali. Electron. Lett., **35**, 1661 (1999).
4. K. Goda, D.R. Solli, K.K. Tsia, B. Jalali. Phys. Rev. A, **80**, 043821 (2009).
5. D.R. Solli, J. Chou, B. Jalali. Nature Photon., **2**, 48 (2008).
6. J. Anaza, L.R. Chen, M.A. Muriel, P.W.E. Smith. Electron. Lett., **35**, 2223 (1999).
7. J. Azana, M.A. Muriel. IEEE J. Quant. Electron., **36**, 517 (2000).
8. K. Goda, B. Jalali. Nature Photon., **7**, 102 (2013).
9. C. Iaconis, I.A. Walmsey. Opt. Lett., **23**, 792 (1998).
10. V. Messenger, F. Louradour, C. Froehly, A. Barthelemy. Opt. Lett., **28**, 743 (2003).
11. J. Piasecki, B. Colombeau, M. Vampouille, C. Froehly, J.A. Arnaud. Appl. Opt., **19**, 3749 (1980).
12. A. Zeytunyan, A. Muradyan, G. Yesayan, L. Mouradian, F. Louradour, A. Barthélémy. Opt. Commun., **284**, 3742 (2011).
13. A. Mahjoubfar, D.V. Churkin, S. Barland, N. Broderick, S.K. Turitsyn, B. Jalali. Nature Photon., **11**, 341 (2017).
14. A.S. Zeytunyan, A. Muradyan, G.L. Yesayan, L.Kh. Mouradian. Laser Physics, **20**, 1729 (2010).

ՄՊԵԿՏՐՈՆԻ ԶԵՎԱԿՈՐՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ԹՎԱՅԻՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆ.
ՓՈՒԼԱՅԻՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ն.ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Հ.ՏՈՆԵՅԱՆ, Ա.ԿՈՒՏՈՒԶՅԱՆ, Մ.ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ,
Վ.ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Դ.ԳՈՒԼԳԱՆՅԱՆ, Կ.ԱՊՐԵՍՅԱՆ, Լ.ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ

Դիսպերսիոն ֆուրյե ձևափոխության տեսանկյունից ուսումնասիրվել են սպեկտրոնի փուլային հասկոությունները: Մեր թվային հետազոտությունները, կատարված տարբեր սկզբնական սպեկտրալ փուլերով իմպուլսների համար, ցույց են տվել, որ սպեկտրոնի ձևավորման ժամանակ կարող է տեղի ունենալ ինֆորմացիայի տեղափոխում սպեկտրալ տիրույթից դեպի ժամանակային՝ ոչ միայն ամպլիտուդի, այլ նաև ճառագայթման դաշտի փուլի համար:

NUMERICAL STUDY OF SPECTRON SHAPING PROCESS: PHASE PECULIARITIES

N. KARAPETYAN, H. TONEYAN, A. KUTUZYAN, M. SUKIASYAN,
V. AVETISYAN, D. GULQANYAN, K. APRESYAN, L. MOURADIAN

The phase peculiarities of spectron in view of the dispersive Fourier transformation are studied. The numerical study for different initial pulses with various initial spectral phases has shown that along with the shaping of the spectron, not only the amplitude information can be transferred from the frequency domain to the time domain, but also the phase information.