Известия НАН Армении, Физика, т.48, №3, с.186-192 (2013)

УДК 621.373

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНОЙ КОМПРЕССИИ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАЦИИ СУММАРНОЙ ЧАСТОТЫ

Г.Л. ЕСАЯН

Ереванский государственный университет, Армения
e-mail: gyesayan@ysu.am

(Поступила в редакцию 26 сентября 2012 г.)

Рассмотрены особенности процесса спектральной компрессии посредством генерации импульса суммарной частоты в случае, когда в качестве опорного импульса используется нелинейно-дисперсионный симиляритон, сгенерированный из части сигнального импульса. Исследована эффективность процесса компрессии в зависимости от интенсивности начального импульса. Рассмотрена возможность спектрального сжатия в отсутствие фазовой самомодуляции, когда длительности и спектральные ширины опорного и сигнального импульсов равны.

Развитие идеи компрессии сверхкоротких импульсов на основе обратимости явления привело к выявлению процесса спектральной компрессии [1-3]. Устройство традиционного спектрального компрессора такое же, как и при волоконно-оптической компрессии импульса. В дисперсионной линии задержки (ДЛЗ) импульс удлиняется, получая отрицательный линейный чирп. Последующее распространение импульса в одномодовом волоконном световоде (ОВС), как в среде с кубической нелинейностью и дисперсией, приводит к гашению чирпа при практически неизменной форме импульса и к сжатию спектра.

Спектральная компрессия нашла широкое применение в оптике сверхбыстрых процессов и лазерной физике, в частности, для регистрации временной огибающей амплитуды и фазы сверхкоротких импульсов путем фурье-преобразования и тонкой частотной перестройки излучения [4], нелинейно-оптической фильтрации шумов [5], генерации временных темных солитонов [6], передачи фемтосекундных импульсов на дальние расстояния без искажений [7], генерации мощных спектрально-ограниченных сверхкоротких импульсов в ОВС с усилением [8], при разработке волоконных лазеров [9] и др. Однако в общем случае, наряду с фазовой самомодуляцией, при исследовании распространения импульсов в световоде следует учитывать такие факторы, как дисперсия второго и третьего порядков, волновая нестационарность и релаксация нелинейности, которые могут приводить к деформациям временного и спектрального профилей импульсов, а также к формированию ударных волн [10]. Влияние

этих факторов на спектральную и временную компрессии излучения проявляются в появлении сателлитов, искажении формы конечного импульса и снижении степени компрессии. Кроме того, приобретенная в процессе фазовой самомодуляции фаза импульса имеет форму его интенсивности и не полностью компенсирует фазу, полученную в ДЛЗ. Поэтому в работах [11,12] для увеличения эффективности спектральной компрессии предложено на входе в ОВС формировать импульсы параболической формы.

В работах [13-15] предложен альтернативный безаберрационный метод спектральной компрессии и спектрально-временного отображения, в котором гашение фазы сигнального импульса производится в процессе суммирования фаз сигнального и опорного импульса при неколлинеарной генерации импульса суммарной частоты в нелинейном кристалле.

В настоящей работе представлены результаты исследований особенностей спектральной компрессии фемтосекундных импульсов в процессе типа частотного смешения, с формированием из части сигнала нелинейно-дисперсионного симиляритона [16,17] в качестве опорного импульса.

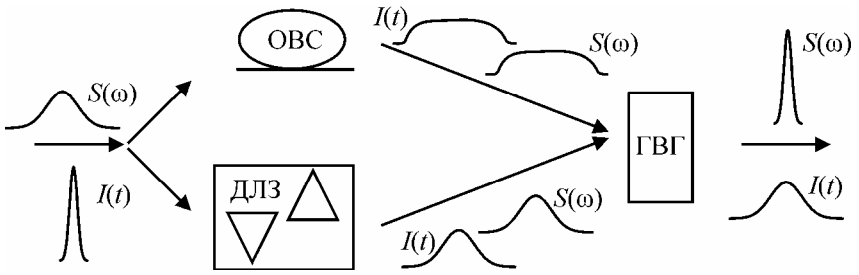

Рис.1. Спектральный компрессор на основе смешения частот. ОВС – одномодовый волоконный световод, ДЛЗ – дисперсионная линия задержки, ГВГ – нелинейный кристалл второй гармоники.

Спектральный компрессор, в котором гашение фазы сигнального импульса производится посредством генерации импульса суммарной частоты сигнального и опорного импульсов в нелинейном кристалле, состоит из ДЛЗ, ОВС и нелинейного кристалла для смешения частот (рис.1). Часть импульса, проходя через дисперсионную линию задержки, удлиняется и приобретает отрицательный чирп без изменений в спектре. Другая часть импульса используется для образования в ОВС опорного импульса – нелинейно-дисперсионного симиляритона. Затем сформированные таким образом импульсы направляются в нелинейный кристалл для генерации суммарной частоты, с умножением комплексных полей:

$$A_{\text{out}}(t) \propto A_d(t) \times A_f(t),$$

где $A_d(t)$ и $A_f(t)$ – комплексные амплитуды удлиненного сигнала и опорного импульса. Гашение чирпа

$$\left\{\varphi_d(t)+\varphi_f(t)\right\}''=0, \tag{1}$$

($\varphi_d(t)$ – индуцированная дисперсией фаза, $\varphi_f(t)$ – фаза опорного импульса) при условии постоянства амплитуды опорного импульса на протяжении удлиненного сигнала

$$\left|A_f(t)\right| = \text{const на протяжении } \left|A_d(t)\right| \tag{2}$$

приводит к спектральной компрессии первоначального спектрально-ограниченного импульса на удвоенной частоте [15].

Сформированный в ОВС из части сигнального импульса нелинейно-дисперсионный симиляритон [16,17] в качестве опорного импульса достаточно хорошо удовлетворяет условиям (1) и (2). Применение нелинейно-дисперсионного симиляритона в методе спектральной компрессии посредством генерации импульса суммарной частоты позволяет реализовать безаберрационную спектральную компрессию, при которой не требуется наличия дополнительного опорного импульса, таким образом, превращая рассматриваемый метод в самоопорный. Важными свойствами симиляритона при этом является линейность чирпа и его независимость от мощности импульса на входе в световод. Это приводит к практически важной особенности метода – независимости степени спектральной компрессии от мощности импульса, в отличие от традиционного метода спектральной компрессии [1-3], в котором даже малое изменение мощности при неизменных длинах световода и ДЛЗ приводит к существенному снижению степени компрессии.

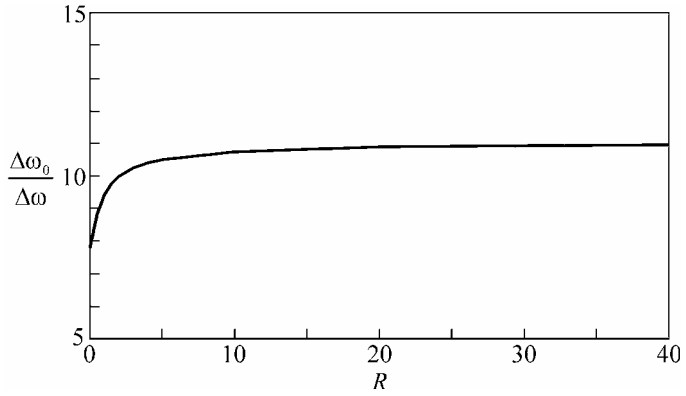

Рис.2. Зависимость степени спектральной компрессии $\Delta\omega_0/\Delta\omega$ от интенсивности начального импульса.

Сказанное подтверждается результатами численного моделирования процесса спектральной компрессии в процессе частотного смешения. На рис.2 представлена зависимость степени спектральной компрессии $\Delta\omega_0/\Delta\omega$ от интенсивности начального импульса в случае, когда в ДЛЗ степень удлинения импульса составляла $\tau/\tau_0 \approx 11$ (τ_0 и τ – начальная и конечная полудлительности

импульса по уровню e^{-1} от максимальной интенсивности, $\Delta\omega_0$ и $\Delta\omega$ – определенные таким же образом начальная и конечная спектральные ширины импульса). Здесь $R = L_D / L_{NL}$ – параметр нелинейности; $L_D = \tau_0^2 / k_2$, k_2 – коэффициент дисперсии второго порядка, $L_{NL} = \left(k n_2 I_0\right)^{-1}$ – длина фазовой самомодуляции, n_2 – коэффициент нелинейности; I_0 – пиковое значение интенсивности на входе. Отметим, что хотя значение R пропорционально I_0, но оно зависит также от длительности импульса и параметров ОВС. В силу этого представленная на рис.2 зависимость имеет общий характер и относится к импульсам различных длительностей. При этом значение пиковой интенсивности, соответствующее конкретному значению параметра R, зависит от длительности начального импульса и параметров ОВС. Так, например, в обычных кварцевых ОВС для импульсов с длительностью на полувысоте $\tau_{1/2} = 100$ фс, значению $R = 1$ соответствует средняя мощность излучения $P \sim 10$ мВт при частоте повторения импульсов 76 МГц. При этом интенсивность импульса определяется радиусом основной моды ОВС и при его типичном значении в несколько микрометров значению $R = 1$ соответствует $I_0 \sim 10^{10}$ Вт$\prod$см^2. Из рис.2 видно, что при изменении интенсивности начального импульса степень спектральной компрессии практически не меняется, за исключением области $R \approx 1$. Это объясняется тем, что при таких малых значениях интенсивности спектральная ширина опорного импульса, сформированного в ОВС, меняется несущественно, что ведет к тому, что длительности опорного и сигнального импульсов близки друг к другу и нарушается условие (2). Вследствие этого длительность результирующего импульса суммарной частоты уменьшается и, соответственно, спектральная ширина увеличивается. При дальнейшем увеличении интенсивности (до $R \approx 5$) степень спектральной компрессии сначала увеличивается и после того, как достигается выполнение условия (2) ($R > 5$), она практически не меняется. Это указывает на независимость фазы опорного импульса от интенсивности в довольно широкой области значений. Отметим, что при $R > 5$ в ОВС практически формируется нелинейно-дисперсионный симиляритон. Численные и спектрально-интерферометрические исследования подтверждают такой характер симиляритонов, сформированных в процессе нелинейно-дисперсионного самовоздействия в ОВС [16,17]. При этом форма, спектр и фаза импульса стремятся к параболической форме по мере возрастания интенсивности. Фаза приобретает параболическую форму с величиной, примерно равной фазе, наведенной при дисперсионном прохождении импульса через ОВС.

Особо следует отметить, что спектральная компрессия достигается и при $R = 0$, когда распространение импульса является чисто дисперсионным (в обычных кварцевых ОВС при $\tau_{1/2} = 100$ фс это соответствует средней мощности $P < 10$ мкВт при частоте повторения импульсов 76 МГц). Таким образом, в рассматриваемом методе спектральной компрессии на основе генерации суммарной частоты механизм фазовой самомодуляции импульса не является необходимым. Это обусловлено тем, что гашение чирпа, полученного в ДЛЗ происходит в нелинейном кристалле в результате генерации суммарной частоты, в от-

личие от традиционного метода спектральной компрессии, где компенсация фазы, происходит благодаря фазовой самомодуляции импульса в ОВС.

На рис.3 представлены экспериментальные результаты, показывающие независимость степени спектральной компрессии от интенсивности опорного импульса. На рисунке приведены спектры опорных импульсов (а) по мере роста интенсивности излучения в волоконном световоде и соответствующие сжатые спектры (б), которые являются практически одинаковыми и сливаются на рисунке. Спектральная ширина симиляритона на полувысоте меняется от $\Delta\lambda \approx 20$ нм до $\Delta\lambda \approx 78$ нм на центральной длине волны 800 нм. В эксперименте использовался ОВС длиной $f = 1$ м при базе ДЛЗ (расстояние между призмами) $d = 2$ м. Средняя мощность излучения в световоде изменялась в пределах 50–470 мВт при частоте повторения импульсов 76 МГц и корреляционной длительности 136 фс (соответствует области $R > 5$ на рис.2). Для генерации суммарной частоты использовался кристалл BBO типа 1 (oo-e) толщиной 0.1 мм. Спектральная ширина сжатого импульса на центральной длине волны 400 нм во всех случаях равнялась $\Delta\lambda_c \approx 0.23$ нм ($\Delta\nu \approx 4.3$ ТГц) при ширине спектра начального импульса на центральной длине волны 800 нм $\Delta\lambda_0 \approx 10$ нм, что соответствует $\Delta\lambda_0 \approx 2.5$ нм на длине волны 400 нм при том же значении $\Delta\nu \approx 4.7$ ТГц.

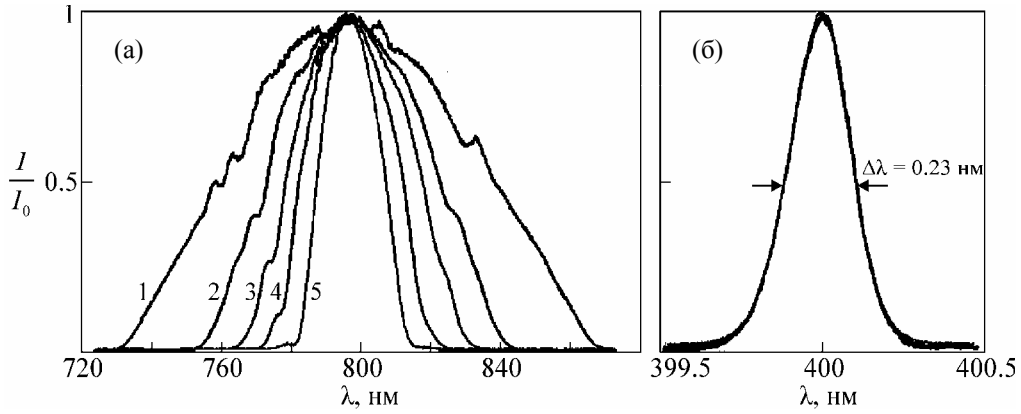

Рис.3. Независимость спектральной компрессии от интенсивности начального импульса: (а) спектральные профили опорного импульса по мере возрастания интенсивности в ОВС: $\Delta\lambda_0 = 78$ нм (1), 50 нм (2), 40 нм (3), 30 нм (4), 20 нм (5); (б) соответствующие сжатые спектры.

Таким образом, применение нелинейно-дисперсионного симиляритона в методе спектральной компрессии посредством генерации импульса суммарной частоты позволяет реализовать безаберрационную спектральную компрессию, при которой не требуется наличия дополнительного опорного импульса, таким образом превращая рассматриваемый метод в самоопорный. Важными свойствами симиляритона при этом являются линейность чирпа и его независимость от интенсивности импульса на входе в световод, что приводит к независимости

степени спектральной компрессии от интенсивности импульса. Этим свойством рассматриваемый метод существенно отличается от традиционного метода спектральной компрессии с последовательным прохождением системы ДЛЗ–ОВС, в котором длины световода и ДЛЗ подбираются с учетом конкретного значения интенсивности импульса, причем даже малое изменение интенсивности начального импульса при неизменных длинах световода и ДЛЗ приводит к существенному снижению степени компрессии и необходимости изменения параметров системы.

Важным свойством метода спектральной компрессии посредством генерации импульса суммарной частоты является также то, что гашение чирпа, полученного в ДЛЗ, происходит в нелинейном кристалле в результате генерации суммарной частоты и механизм фазовой самомодуляции импульса не является необходимым. Это обстоятельство имеет и практическое значение, так как позволяет осуществить спектральную компрессию слабых импульсов, что может быть полезным, в частности, для задач телекоммуникации и передачи фемтосекундных импульсов.

Автор выражает благодарность А.С. Зейтуняну за полезные обсуждения и помощь в работе. Данная работа выполнена в рамках гранта ANSEF PS-opt-2903.

ЛИТЕРАТУРА

1. **L.Mouradian, F.Louradour, V.Messeger, A.Barthelemy, C.Froehly.** IEEE J. Quant. Electron., **36**, 795 (2000).
2. **Н.Л.Маркарян, Л.Х.Мурадян, Т.А.Папазян.** Квант. электрон., **18**, 865 (1991).
3. **L.Kh.Muradyan, N.L.Markaryan, T.A.Papazyan, A.A.Ohanyan.** Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO, 90), USA, Technical Digest, p.120, CTUH32 (1990).
4. **E.T.J.Nibbering, M.A.Franco, et al.** Opt. Commun., **119**, 479 (1995).
5. **Т.А.Папазян, Л.Х.Мурадян, Н.Л.Маркарян, А.В.Зограбян.** Изв. НАН Армении, Физика, **27**, 128 (1992).
6. **А.А.Кутузян, А.А.Киракосян, Л.Х.Мурадян.** Изв. НАН Армении, Физика, **37**, 350 (2002).
7. **S.W.Clark, F.O.Ilday, F.W.Wise.** Opt. Lett., **26**, 17 (2001).
8. **T.Schraiber, A.Liem, F.Roeser, et al.** Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., **5709**, 32 (2005).
9. **S.Boscolo, S.K.Turitsyn, C.Finot.** 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2012, p.1.
10. **G.P.Agrawal.** Nonlinear Fiber Optics. Boston, Academic Press, 2007.
11. **E.R.Andresen, J.M.Dudley, D.Oron, C.Finot, H.Rigneault.** Opt. Lett., **36**, 707 (2011).
12. **J.Fatome, B.Kibler, E.R.Andresen, et al.** Appl. Optics, **51**, 4547 (2012).
13. **A.Zeytunyan, M.Kalashyan, K.Palanjyan, T.Mansuryan, A.Kutuzyan, G.Yesayan, L.Mouradian.** Proc. Conf. Laser Physics-2006. Ashtarak, Armenia, 2007, pp.185-188.
14. **T.Mansuryan, A.Zeytunyan, M.Kalashyan, G.Yesayan, L.Mouradian.** Proc. 4th Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL-2008), 2008, p.149.
15. **T.Mansuryan, A.Zeytunyan, M.Kalashyan, G.Yesayan, L.Mouradian, F.Louradour, A.Barthélémy.** J. Opt. Soc. Am. B, **25**, A101 (2008).
16. **А.С.Зейтунян, К.А.Паланджян, Г.Л.Есаян, Л.Х.Мурадян,** Изв. НАН Армении, Физика, **45**, 97 (2010).
17. **A.Zeytunyan, G.Yesayan, L.Mouradian, P.Kockaert, P.Emplit, F.Louradour, A.Barthélémy.** J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public., **4**, 09009 (2009).

ԳՈՒՄԱՐԱՅԻՆ ՀԱՃԱԽՈՒԹՅԱՆ ԳԵՆԵՐԱՑՄԱՆ ՎՐԱ ՀԻՄՆՎԱԾ ՍՊԵԿՏՐԱԼ ՍԵՂՄՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Գ.Լ. ԵՍԱՅԱՆ

Քննարկված են գումարային հաճախության իմպուլսի գեներացման միջոցով սպեկտրալ սեղմման պրոցեսի առանձնահատկությունները, երբ որպես նեցուկ իմպուլս օգտագործվում է ազդանշանային իմպուլսի մի մասից գեներացված ոչ գծային-դիսպերսային սիմիլարիտոնը: Հետազոտված է սեղմման պրոցեսի արդյունավետությունը՝ կախված նախնական իմպուլսի ինտենսիվությունից: Քննարկված է սպեկտրալ սեղմման հնարավորությունը փուլային ինքնամոդուլացման բացակայության պայմաններում, երբ նեցուկ և ազդանշանային իմպուլսների տևողություններն ու սպեկտրալ լայնությունները հավասար են:

FEATURES OF SPECTRAL COMPRESSION BASED ON SUM-FREQUENCY GENERATION

G.L. YESAYAN

Peculiarities of the process of spectral compression through sum-frequency generation are discussed for the case when nonlinear-dispersive similariton generated from a part of the signal is used as a reference pulse. The compression efficiency depending on the initial pulse intensity is studied. The possibility of spectral compression is discussed in the absence of self-phase modulation, when the reference and signal pulses have the same durations and spectral bandwidths.