

ПЕРЕДАЧА 45 БИТ ИНФОРМАЦИИ ПАРОЙ ИНТЕРФЕРИРУЮЩИХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ СО СВЕРХШИРОКИМИ СПЕКТРАМИ

© 2013 г. А. Н. Цыпкин*, аспирант; С. Э. Путилин*, канд. физ.-мат. наук;
М. В. Мельник*, студент; С. С. Клыков**, студент;
С. А. Козлов*, доктор физ.-мат. наук

* Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

** Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов

E-mail: tsypkinan@mail.ru

Экспериментально продемонстрирована оптическая запись и передача 45 бит информации одним квазидискретным спектральным суперконтинуумом, формируемым при интерференции двух фемтосекундных импульсов со сверхширокими спектрами с временной задержкой между ними, меньшей длительности каждого импульса.

Ключевые слова: фемтосекундный импульс, спектральный суперконтинуум, время когерентности, интерферометр Майкельсона, запись информации, передача информации.

Коды OCIS: 190.7110; 200.3050

Поступила в редакцию 19.01.2013

Введение

В настоящее время значительное внимание уделяется изучению возможностей практического использования сверхкоротких оптических импульсов со сверхширокими спектрами [1–2], уже нашедших применение в нелинейной микроскопии [3], для генерации предельнокоротких импульсов [4], в оптической когерентной томографии [5] и системах сверхбыстрой передачи информации [6].

Отдельное и важное место в проблеме эффективной генерации и использования импульсов со сверхширокими спектрами занимает задача формирования квазидискретного спектрального суперконтинуума и использования его в системах мультиплексирования по длине волны связи (*wavelength division multiplexing* – WDM) [6–10]. Авторами работы [6] было показано, что взаимодействие двух сонаправленных фемтосекундных импульсов света с различным спектральным составом в нелинейной диэлектрической среде с нормальной дисперсией групповой скорости

может привести к образованию квазидискретного спектрального суперконтинуума, временная структура которого представляет регулярную последовательность ультракоротких импульсов с терагерцовой частотой повторения.

В работе [9] была показана возможность передачи информации с использованием квазидискретного спектрального суперконтинуума. Формирование квазидискретного спектра обеспечивалось за счет спектральной интерференции двух спектральных суперконтинуумов, задержанных друг относительно друга на временной интервал, значительно больший длительности каждого импульса. Такая большая задержка между интерферирующими импульсами приводит к увеличению частоты повторения спектральных линий в квазидискретном спектре, т. е. и к увеличению общего их количества. Каждая из этого множества спектральная линия использовалась как отдельный канал системы мультиплексирования по длине волны.

В работах [7, 8] продемонстрирована другая возможность передачи информации квазиди-

скретным спектральным суперконтинуумом. Было показано, что в результате интерференции двух фемтосекундных спектральных суперконтинуумов, когда временная задержка не превышает длительность импульсов, также формируется квазидискретный спектр, которому соответствует последовательность фемтосекундных субимпульсов. Был предложен способ оптической записи целой страницы информации в последовательности субимпульсов и соответствующем ей квазидискретном спектре, которые по сути представляют собой одну пару интерферирующих фемтосекундных импульсов. В данной работе оптическая запись и передача 45 бит информации такой парой интерферирующих импульсов со сверхширокими спектрами продемонстрирована экспериментально.

Генерация фемтосекундного квазидискретного спектрального суперконтинуума

Используемая в работе лазерная система генерации фемтосекундного квазидискретного спектрального суперконтинуума приведена на рис. 1. Основной экспериментальной установки являлся лазер 1 на кристаллах титан-сапфира, накачиваемый второй гармоникой неодимового непрерывного твердотельного лазера с диодной накачкой. Для компенсации chirpa излучения в лазере использовался внешний компенсатор дисперсии. Центральная длина волны излучения составля-

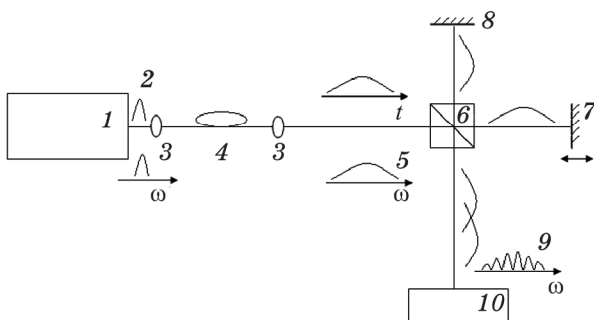


Рис. 1. Экспериментальная установка генерации квазидискретного фемтосекундного спектрального суперконтинуума. 1 – фемтосекундный лазер, 2 – временная структура импульса и его спектра, 3 – микрообъективы $20\times$, 4 – микроструктурированное волокно, 5 – спектральный суперконтинуум, 6 – светоделительный куб, 7 – сканирующее зеркало, 8 – опорное зеркало, 9 – квазидискретный спектральный суперконтинуум, 10 – спектрометр.

ла 780 нм, длительность импульса – 20 фс (2), частота следования импульсов – 100 МГц, средняя мощность лазерного излучения – 330 мВт, интенсивность – 10^6 Вт/см².

Сверхуширение спектра лазерных импульсов осуществлялось в микроструктурированном волокне МС-38 (4). Для ввода и вывода излучения в микроструктурированное оптическое волокно использовались два трехкоординатных столика и два микрообъектива ЛОМО-20 (3). При фокусировании с помощью микрообъективов интенсивность излучения на входе в волокно составляла $4,0 \times 10^8$ Вт/см². Измерения сверхуширенного в волокне спектра фемтосекундных импульсов проводились с помощью спектрометра ASP100 (10) в диапазоне длин волн 190–1100 нм, с временем интегрирования 10 мс.

Для формирования квазидискретного спектрального суперконтинуума использовалась схема интерферометра Майкельсона. Спектральный суперконтинуум (5) попадал в светоделительный куб 6. После него излучение попадало на сканирующее зеркало 7, движение которого обеспечивала микрометрическая подвижка *Standa*, и на опорное зеркало 8. На выходе из интерферометра формировался квазидискретный спектр (9).

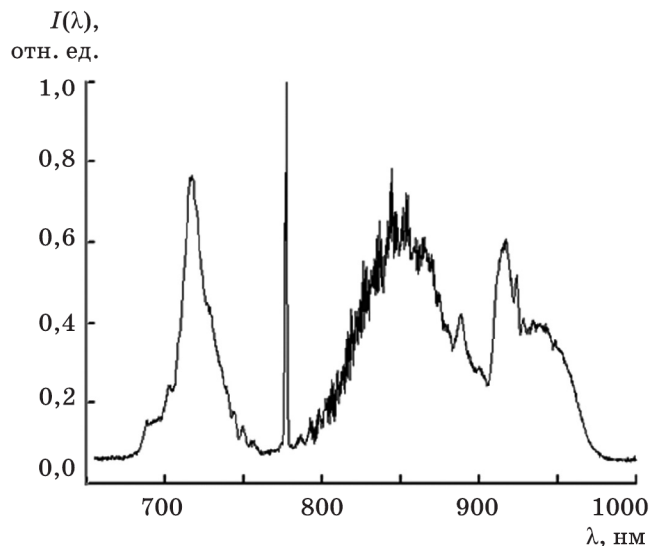


Рис. 2. Зависимость модуля в квадрате спектральной плотности I от длины волны λ на выходе из микроструктурированного волокна МС-38 длиной 30 см.

На рис. 2 приведен спектральный суперконтинуум $I(\lambda)$, который генерировался в микроструктурированном волокне длиной 30 см. Как видно из рисунка, спектр излучения на выходе

из волокна простирался от 650 до 950 нм. Узкая спектральная линия, соответствующая длине волны 780 нм, обусловлена образованием связанных резонаторов в связи с отсутствием поляризационной развязки.

Было определено время когерентности получаемого спектрального суперконтинуума. Для этого использовалась схема оптического коррелятора первого порядка, приведенная на рис. 3. Суперконтинуум попадал в светоделительный кубик 1. После него излучение шло на зеркало 2, сканирование которого обеспечивала микрометрическая подвижка *Standa*, а также на опорное зеркало 3. Шаг сканирования составлял 1,333 фс. Результирующее поле регистрировалось фотодиодным приемником 4, сигнал с которого передавался на персональный компьютер. Время когерентности на выходе из волокна МС-38 по уровню нулевой интенсивности (по уровню шумов) составляло 400 фс.

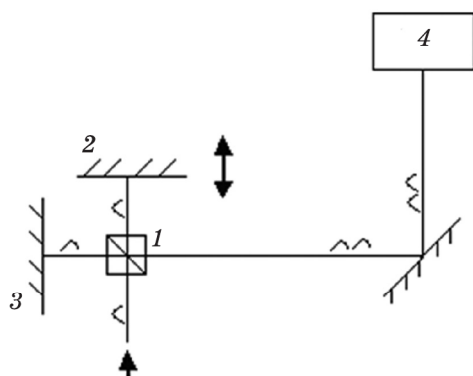


Рис. 3. Схема оптического коррелятора первого порядка для определения времени когерентности спектрального суперконтинуума. 1 – светоделительный кубик, 2 – сканирующее зеркало, 3 – опорное зеркало, 4 – фотоприемник.

Квазидискретный спектральный суперконтинуум $I(\lambda)$ формировался в интерферометре Майкельсона (см. рис. 1) при временной задержке между импульсами 300 фс. Его характерный вид приведен на рис. 4. Подчеркнем, что временная задержка была выбрана меньшей времени когерентности импульса (и, разумеется, меньше его длительности). В результате этого формировались 45 спектральных линий, каждая из них рассматривалась как 1 бит информации.

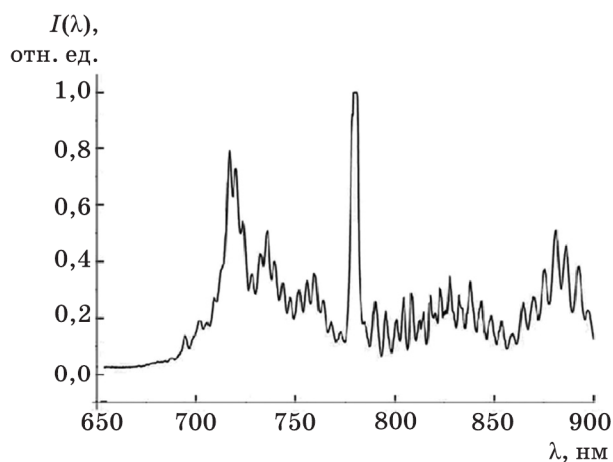


Рис. 4. Зависимость модуля в квадрате спектральной плотности I квазидискретного спектрального суперконтинуума, формируемого при временной задержке между импульсами в интерферометре, равной 300 фс, от длины волны λ .

Запись и передача информации фемтосекундным квазидискретным спектральным суперконтинуумом

Схема экспериментальной установки записи и передачи информации фемтосекундным квазидискретным спектральным суперконтинуумом приведена на рис. 5. Она включает в себя двойной монохроматор с вычитанием дисперсии для за-

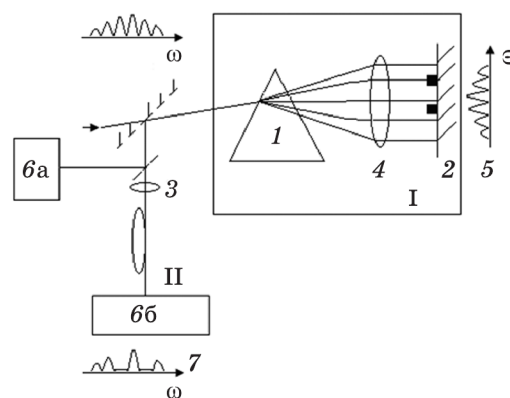


Рис. 5. Экспериментальная установка кодирования информации в квазидискретном спектральном суперконтинууме и передачи ее по оптической линии связи. I – двойной монохроматор с вычитанием дисперсии, II – оптическая линия связи. 1 – призма, 2 – матрица кодировки, 3 – микрообъектив $20\times$, 4 – линза, 5 – пространственный квазидискретный спектр суперконтинуума, 6 (а, б) – спектрометр, 7 – закодированный квазидискретный спектральный суперконтинуум.

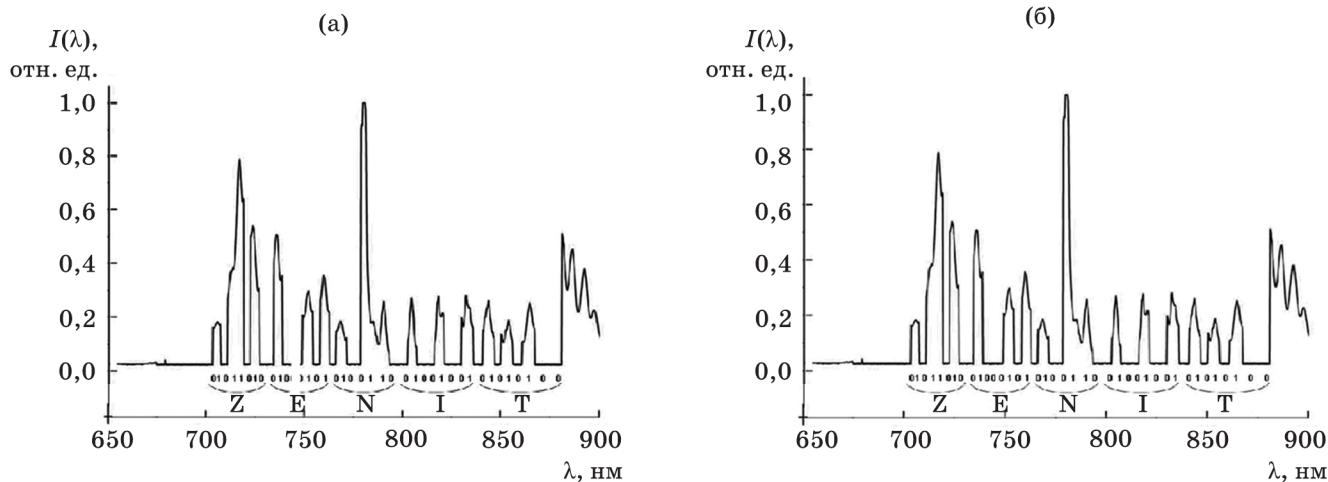


Рис. 6. Закодированный квазидискретный спектр на входе в оптическую линию связи (а) и на выходе из линии связи (б). Закодированная в двоичном коде информация в квазидискретном спектре – слово «ZENIT».

писи информации (I) и оптическую линию связи (II). Двойной монохроматор был собран по автоколлимационной схеме и состоял из призмы, линзы и зеркала с матрицей кодировки. Призма 1 осуществляла угловое спектральное разложение квазидискретного спектрального суперконтинуума. В задней фокальной плоскости линзы 4 формировался пространственный квазидискретный спектр суперконтинуума 5. В этой же плоскости было размещено зеркало. В качестве матрицы кодировки использовался транспарант из черной бумаги 2, который крепился на зеркало. Закодированное излучение квазидискретного спектрального суперконтинуума после отражения от зеркала проходило через линзу и поступало на призму, где происходило его спектральное сложение. Далее излучение заводилось в оптическую линию связи с использованием трехкоординатных микрометрических подвижек и микрообъективов $20\times$ (3). Оптическая линия связи – одномодовое оптическое волокно длиной 10 м, измерения спектра на выходе из него проводились с помощью спектрометра ASP100 в диапазоне длин волн 190–1100 нм.

При прохождении матрицы кодировки, расположенной на зеркале двойного монохроматора, происходило кодирование квазидискретного спектрального суперконтинуума в двоичной системе. Оставленная линия в квазидискретном спектре означала «1», вырезанная транспарантом – «0». Для конкретной реализации было выбрано слово «ZENIT». Закодированное слово регистрировалось с помощью спектрометра сначала перед оптической линией связи

(рис. 5, ба), а затем после нее (рис. 5, бб). Закодированный квазидискретный спектр на входе в оптическую линию связи $I(\lambda)$ приведен на рис. 6а, на выходе из линии связи – на рис. 6б. Из рисунка видно, что при распространении в одномодовом волокне изменения спектральных компонент закодированного квазидискретного спектра практически не наблюдалось.

Заключение

В работе экспериментально апробирован способ оптической записи и передачи информации с использованием квазидискретного спектрального суперконтинуума, формируемого при интерференции двух фемтосекундных импульсов со сверхшироким спектром. Временная задержка между импульсами при интерференции составляла 300 фс, что было меньше времени когерентности импульсов. В одной паре интерферирующих фемтосекундных импульсов было записано одно слово, содержащее 45 бит информации. Эта информация без искажения была передана через оптическую линию связи.

Авторы выражают благодарность за предоставление микроструктурированного волокна МС-38 доктору физ.-мат. наук Виктору Сергеевичу Шевандину.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашения № 14.В37.21.0248, № 14.132.21.1392, № 14.В37.21.0907, гранты №16.740.11.0459 и РФФИ № 12-02-31633.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dudley J. M., Genty G., Coen S.* Supercontinuum generation in photonic crystal fiber // *Rev. Mod. Phys.* 2006. V. 78. P. 1135–1184.
 2. *Ranka J. K., Windeler R. S., Stentz A. J.* Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm // *Opt. Lett.* 2000. V. 25. № 1. P. 25–27.
 3. *Rinia H.A., Bonn M., Müller M., Vartiainen E.M.* Quantitative CARS spectroscopy using the maximum entropy method: the main lipid phase transition // *Chem. Phys. Chem.* 2007. V. 8. № 2. P. 279–287.
 4. *Dudley J.M., Coen S.* Fundamental limits to few-cycle pulse generation from compression of supercontinuum spectra generated in photonic crystal fiber // *Opt. Exp.* 2004. V. 12. № 11. P. 2423–2428.
 5. *Povazay B., Bizheva K., Unterhuber A., Hermann B., Sattmann H., Fercher A.F., Drexler W., Apolonski A., Wadsworth W.J., Knight J.C., Russell P.S., Vetterlein M., Scherzer E.* Submicrometer axial resolution optical coherence tomography // *Opt. Lett.* 2002. V. 27. № 20. P. 1800–1802.
 6. *Bakhtin M.A., Kozlov S.A.* Generation of the discrete spectral supercontinuum in two intensive ultrashort pulses interaction // *Optical Memory and Neural Network.* 2006. V. 15. № 1. P. 1–10.
 7. *Козлов С.А., Дроздов А.А., Цыпкин А.Н.* Устройство для формирования последовательности фемтосекундных световых импульсов // Патент России № 87058. 2009.
 8. *Белашенков Н.Р., Дроздов А.А., Козлов С.А., Шполянский Ю.А., Цыпкин А.Н.* Фазовая самомодуляция фемтосекундных световых импульсов, спектры которых сверхуширены в диэлектриках с нормальной групповой дисперсией // *Оптический журнал.* 2008. Т. 75. № 10. С. 3–8.
 9. *Alfano R.R.* Method and apparatus for producing a multiple optical channel source from a supercontinuum generator for WDM communication // Patent USA № 7245805. 2007.
 10. *Corsi C., Tortora A., Bellini M.* Mutual coherence of supercontinuum pulses collinearly generated in bulk media // *Appl. Phys. B.* 2003. V. 77. № 2–3. P. 255–290.
-