

# СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА ПО ОПТОВОЛОКОННОЙ ЛИНИИ МЕТОДОМ ВНЕШНЕЙ МОДУЛЯЦИИ

## WAVEFORM TRANSMISSION FIBER OPTIC SYSTEM WITH EXTERNAL MODULATION

*Н. Г. Игнатьев, П. С. Крапива, К. Е. Коротков, И. Н. Москаленко, С. С. Пусков*  
*N. G. Ignatiev, P. S. Krapiva, K. E. Korotkov, I. N. Moskalenko, S. S. Piskov*

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова» (ВНИИА)  
Federal State Unitary Enterprise «Dukhov Research Institute of Automatics» (VNIIA)

Аналоговые широкополосные электрические сигналы, зарегистрированные в экспериментах на мощных физических установках, возможно преобразовать в оптические сигналы для передачи на удаленно расположенные регистраторы по волоконно-оптическим линиям с сохранением временного разрешения детектора. Показаны системы передачи с использованием волоконных компонентов С-диапазона и регистрацией твердотельными фотоприемниками и компонентов первого окна прозрачности оптоволокна с регистрацией стрик-камерой. Показан динамический диапазон не менее 200. Предложен метод определения функции пропускания модулятора непосредственно во время проведения эксперимента.

On powerful physical facilities broadband electrical signals of detectors are possible to be converted into optical domain. Optical signal can be transmitted to remotely located recorders via fiber-optic links while maintaining temporal resolution of detectors. We present Mach-Zehnder modulators based transmission systems at wavelength of 1550 nm and 850 nm with registration to solid-state photodiodes and streak-camera respectively. We have demonstrated dynamic range of at least 200. We present the new method of determining transmission function of the modulator during the experiment.

Проведение экспериментов на мощных физических установках, в том числе для лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), требует исследования однократных процессов нано- и субнаносекундной длительности. Импульсы оптического или ионизирующего излучения (ИИ) преобразуются с помощью фотоэлемента (ФЭ) или фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) в импульсы электрического тока [1], регистрация которых проводится с использованием аналого-цифровых преобразователей. Для защиты регистрирующей аппаратуры от возникающих во время экспериментов импульсов электромагнитного и ионизирующего излучений, потоков элементарных частиц, её необходимо размещать на значительном (десятки, несколько сотен метров) расстоянии от камеры взаимодействия в специально оборудованных помещениях. Малая длительность исследуемых процессов (100 пс – 50 нс) и значительные расстояния от детекторов до регистраторов требуют отказа от традиционных методов передачи аналоговых сигналов при помощи коаксиальных кабелей и

разработки новых, помехоустойчивых, сохраняющих временное разрешение и обладающих повышенной информационной емкостью методов передачи зарегистрированной информации.

В отличие от коаксиальных кабелей, оптоволоконные линии нечувствительны к электромагнитным помехам, имеют крайне малые потери (коэффициент затухания для волокон в области 1550 нм составляет ~0,2 дБ/км), практически одинаковые для всей рабочей полосы частот, обладают большой полосой пропускания и низкой дисперсией, что позволяет осуществлять передачу оптических аналогов зарегистрированных электрических импульсов на значительные расстояния с сохранением временного разрешения. Перевод электрического сигнала в оптический аналог возможно осуществлять как модуляцией параметров непосредственно источника оптического излучения (в большинстве случаев – тока накачки лазерного диода (ЛД)) – линия с прямой модуляцией, так и с использованием модуляторов излучения непрерывного источника – линия с внешней модуляцией.

По сравнению с прямой модуляцией, метод внешней модуляции обладает существенными преимуществами: независимостью амплитудно-частотных характеристик модулятора от оптической мощности в линии передачи, высокой максимальной частотой передаваемого сигнала, определяемой конструкцией модулятора [2], возможностью применения технологии частотного уплотнения DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) при построении системы передачи сигналов.

Важным параметром для линии передачи является динамический диапазон (ДД), определяемый как отношение максимального регистрируемого сигнала  $S_{\max}$  к минимальному регистрируемому  $S_{\min}$ :

$$\text{ДД} = S_{\max}/S_{\min} \quad (1)$$

Значение  $S_{\min}$  ограничено шумами регистрации. Для уверенного выделения минимального сигнала на фоне шумов отношение  $S_{\min}$  к шуму должно быть больше единицы, например, равно пяти, что существенно ограничивает ДД системы передачи. Значение  $S_{\max}$  определяется искажениями линии передачи. Использование внешней модуляции позволяет существенно увеличить ДД [3, 4].

В качестве модуляторов в нашей работе используются интегральные электрооптические модуляторы по схеме интерферометра Маха-Цендера (ММЦ). Системы передачи на основе ММЦ применяются для передачи как цифровых, так и аналоговых сигналов, в том числе при проведении экспериментов по ЛТС [3-8].

Функция пропускания (ФП) ММЦ (зависимость пропускания ММЦ от амплитуды сигнала на сигнальном входе) имеет синусоидальную форму. При превышении электрического сигнала значения полуволнового напряжения происходит перескок в соседнюю интерференционную полосу, что делает невозможным однозначное восстановление формы передаваемого сигнала и существенно уменьшает ДД линии передачи выполненной с использованием одного ММЦ.

Для увеличения ДД сигнал с одного детектора направляется на два ММЦ с использованием нониусной [3] или квадратурной [4] схем формирования информационных каналов. Обработка оптических сигналов обоих каналов позволяет однозначно восстанавливать форму передаваемого сигнала.

В квадратурной схеме один из модуляторов настраивается на максимум (или минимум) пропускания, второй - на середину склона ФП (точка

квадратуры), электрический сигнал подается на оба ММЦ в равных долях. В то время как один из ММЦ находится в экстремуме ФП, другой находится на склоне ФП, что позволяет определить знак производной электрического сигнала.

В нониусной схеме оба ММЦ настраиваются в точку квадратуры, электрический сигнал делится между ММЦ в некотором отношении. Коэффициент деления выбирается таким образом, что в канале с большим ослаблением электрический сигнал не должен вызывать перескок в соседнюю интерференционную полосу, что позволяет избежать неоднозначности при последующем восстановлении формы сигнала. Канал с меньшим ослаблением чувствителен к малым изменениям электрического сигнала, что уменьшает нижний предел ДД, но приводит к перескокам между интерференционными полосами ММЦ.

При проведении процедуры восстановления формы передаваемого сигнала как при квадратурной, так и при нониусной схемах формирования информационных каналов, необходимо обладать информацией о форме ФП ММЦ и его рабочей точке. Форма ФП определяется априори [9, 10]. Для задания рабочей точки используются специализированные контроллеры рабочей точки (bias controller). Принцип работы контроллеров требует наличия постоянного оптического сигнала на входе ММЦ и значительного времени для установки рабочей точки, что приводит к необходимости внесения изменений в схему контроллера, усложнению схемы эксперимента и увеличению времени подготовки [3, 4].

Альтернативой применения контроллеров рабочей точки является определение ФП и рабочей точки ММЦ непосредственно перед подачей на сигнальный вход ММЦ передаваемого (информационного) сигнала. Регистрация ИИ при помощи ФЭ или ФЭУ приводит к образованию однополярных импульсов электрического тока. Поэтому для определения ФП ММЦ возможно использовать сигнал заранее известной формы (настроечный сигнал), полярность которого соответствует полярности информационного сигнала, а амплитуда не менее ожидаемой амплитуды информационного сигнала. Настроечный сигнал необходимо подавать на сигнальный вход модулятора перед подачей информационного сигнала. На рис. 1 а показана осциллограмма подаваемого на сигнальные электроды ММЦ сигнала, состоящего из настроечного (1) и информационного (2) сигналов. На выходе модулятора приемником оптического излучения регистрируется последовательность изменений интенсивности оптического излучения

(рисунок 1 б)), вызванных настроечным (3) и информационным (4) сигналами. По известной форме настроечного сигнала и зарегистрированному изменению интенсивности, вызванному этим сигналом, производится определение рабочей точки и ФП ММЦ. Затем по зарегистрированному изменению интенсивности (рисунок 1 б), поз. 4), вызванному информационным сигналом, и определенной ФП модулятора производится восстановление формы передаваемого сигнала (рисунок 1 а), поз. 2). Использование настроечного сигнала позволяет восстанавливать форму информационного сигнала при настройке ММЦ не только на максимум/минимум пропускания или квадратуры, но и в произвольную точку ФП.

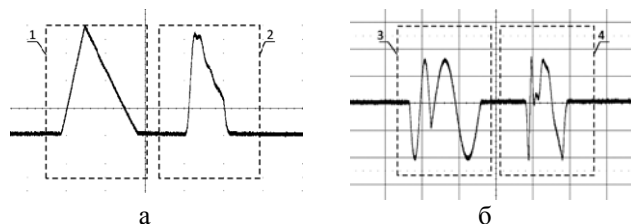


Рис. 1. Осциллограммы сигналов в линии передачи а – электрический сигнал, подаваемый на сигнальный вход модулятора, б – оптический сигнал, соответствующий электрическому сигналу. 1 – настроечный сигнал, 2 – информационный сигнал, 3 – изменения интенсивности, вызванные настроечным сигналом, 4 – изменения интенсивности, вызванные информационным сигналом

На рис. 2 показана схема стенда по исследованию системы передачи аналоговых сигналов по оптоволоконной линии С-диапазона (1550 нм) с использованием ММЦ и технологии спектрального уплотнения DWDM. Непрерывное излучение ЛД 1 и 2 при помощи DWDM-разветвителя 3 направляется в один отрезок волокна с сохранением

поляризации. При помощи DWDM-разветвителя с сохранением поляризации 4 оптическое излучение разделяется по длинам волн и направляется на соответствующий ММЦ (5 и 6). Промодулированное по интенсивности оптическое излучение при помощи DWDM-разветвителя 13 направляется в оптическое волокно длиной 1 км. Далее, при помощи DWDM-разветвителя 14 оптическое излучение разделяется по длинам волн и направляется на фотоприемники 7 и 8, электрический сигнал с которых регистрируется осциллографом 9. Установка рабочей точки ММЦ осуществляется с использованием источников питания 10 и 11, соединенными с электродами сдвига (Bias IN) соответствующего ММЦ. Последовательность настроечного и информационного сигналов подается с программируемого генератора 12 на сигнальные входы (RF IN) ММЦ. Такая схема позволяет исследовать схемы формирования информационных каналов, аналогичных нониусной и квадратурной.

На рис. 3 приведены результаты передачи сигнала колоколообразной формы. Для формирования информационных каналов используется схема, аналогичная квадратурной. Форма восстановленного сигнала совпадает с формой передаваемого сигнала.

В линии передачи, построенной на основе двух (и более) ММЦ величина  $S_{\max}$  существенно превосходит величину максимального сигнала линии на основе одного ММЦ и может составлять десятки вольт. В предложенном методе определения ФП и рабочей точки модулятора величина  $S_{\max}$  определяется амплитудой настроечного сигнала и для используемого программируемого генератора (рис. 2 поз. 12) не превышает 10 В. При передаче однократного сигнала экспериментально опреде-

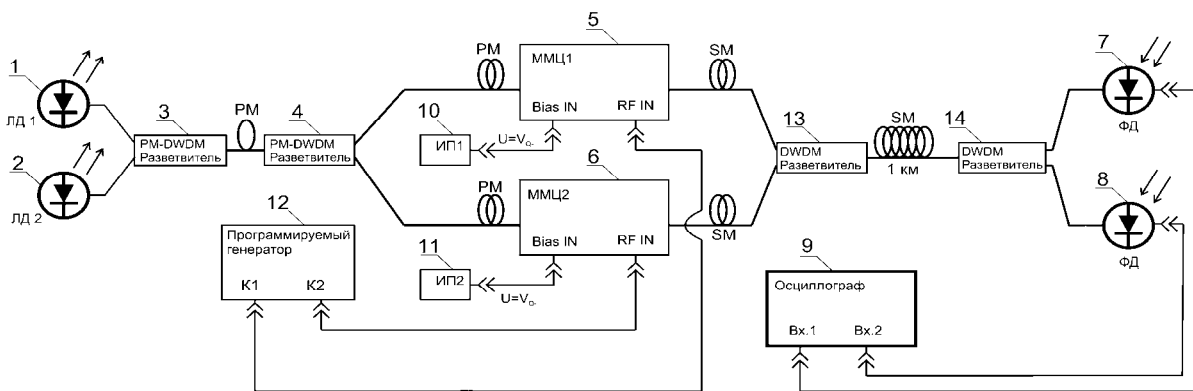
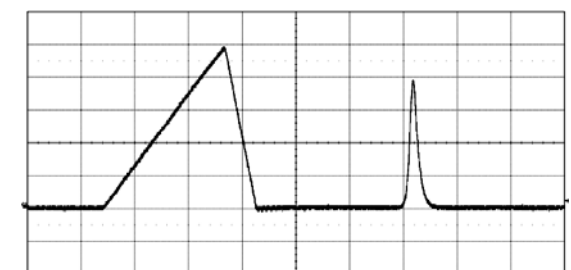
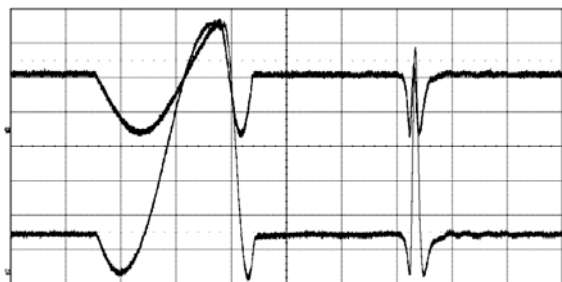


Рис. 2. Схема стенда по исследованию системы передачи аналоговых сигналов с использованием внешней модуляции и спектрального уплотнения DWDM. 1, 2 – ЛД, 3, 4 – DWDM-разветвители с сохранением поляризации; 5, 6 – ММЦ; 7, 8 – фотоприемники; 9 – осциллограф; 10, 11 – источники питания; 12 – программируемый генератор; 13, 14 – одномодовые DWDM-разветвители.

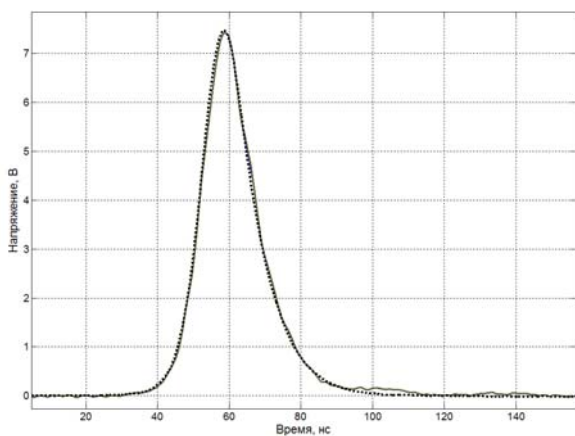
лённая величина  $S_{\min}$  не превышает 50 мВ при оптической мощности ЛД в обоих плечах системы передачи 13 дБм (20 мВт).  $S_{\min}$  определяется в плече без ослабления нониусной схемы формирования информационных каналов или в плече, настроенном на точку квадратуры для квадратурной схемы. Таким образом ДД линии передачи с использованием волоконных компонентов С-диапазона и технологии DWDM составляет не менее 200.



а



б



в

Рис. 3. Результаты экспериментов по передаче колоколообразного сигнала с использованием квадратурной схемы формирования информационных каналов: а – передаваемый электрический сигнал, б сигналы фото-приемников, в – сравнение восстановленного (сплошная линия) и передаваемого (пунктир) сигналов.

В качестве приемников оптического излучения С-диапазона используются быстродействующие

твердотельные фотодиоды на основе InGaAs-структур, регистрация электрического сигнала производится с использованием цифровых осциллографов. Для регистрации быстропротекающих процессов требуются осциллографы с полосой пропускания до единиц ГГц и соответствующей частотой дискретизации. Альтернативным регистратором быстропротекающих процессов являются хронографические электронно-оптические регистраторы (ЭОР) с субпикосекундным временным разрешением (стрик-камеры). Ширина фотокатода позволяет проводить регистрацию нескольких информационных каналов линии передачи на одну стрик-камеру. Для использования стрик-камер в качестве приемника оптического излучения необходимо использовать источники оптического излучения, ММЦ и волоконные компоненты, работающие в диапазоне спектральной чувствительности существующих фотокатодов. По совокупности требований по полосе частот модуляции, длине волны оптического излучения, характеристикам волоконных компонентов для передачи сигналов наносекундного диапазона при регистрации на стрик-камеру выбрано первое окно прозрачности оптического волокна (длина волны оптического излучения 850 нм).

На рис. 4 показана схема стенда по исследованию системы передачи аналоговых сигналов по оптоволоконной линии с использованием ММЦ и регистрацией на стрик-камеру. Для предотвращения постоянной засветки фотокатода стрик-камеры 12, из непрерывного излучения ЛД 1 при помощи акусто-оптического модулятора (АОМ) 2 формируются прямоугольные оптические импульсы. Длительность оптического импульса определяется длительностью цуга синусоидального напряжения, подаваемого на АОМ с драйвера 9, и соответствует длительности электрического сигнала. При помощи разветвителя с сохранением поляризации 3 оптический импульс подается на входы ММЦ 4, 5. Установка рабочей точки ММЦ осуществляется с использованием источников питания 6 и 7, соединенными с электродами сдвига (Bias IN) соответствующего ММЦ. Электрический сигнал состоит из последовательности настроечного и информационного сигналов и подается на сигнальные входы (RF IN) ММЦ с программируемого генератора 10. Модулированное по интенсивности оптическое излучение направляется в пигтейлы из оптического одномодового волокна, закрепленные на входе стрик-камеры. Регистрация изображения на экране стрик-камеры осуществляется с использованием ПЗС-регистратора 13. Для формирования дополнительных меток времени на

регистрограмме используется генератор оптических меток 11 – лазерный диод, работающий в импульсном режиме. Для формирования пусковых импульсов используется генератор 8.

На рис. 5 представлена хронограмма передачи электрического сигнала с использованием схемы формирования информационных каналов, аналогичной квадратурной. По горизонтали – временная ось регистрации, по вертикали – направление вдоль фотокатода. Показаны оптические метки времени и информационные каналы. Частота временных меток составляет 250 МГц.

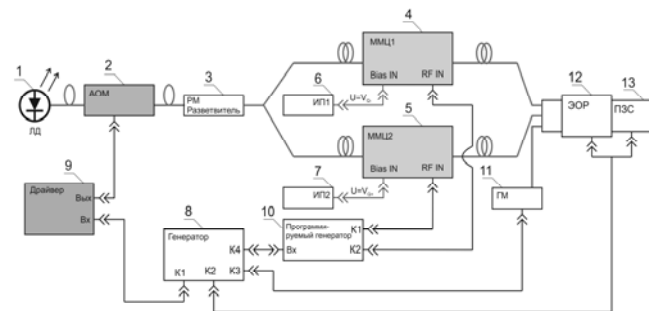


Рис. 4. Схема стенда по исследованию системы передачи аналоговых сигналов с использованием внешней модуляции и регистрации на стрик-камеру. 1 – ЛД, 2 – АОМ, 3 – разветвитель с сохранением поляризации; 4, 5 – ММЦ; 6, 7 – источники питания; 8 – генератор пусковых импульсов; 9 – драйвер АОМ; 10 – программируемый генератор; 11 – генератор оптических меток, 12 – хронографический ЭОР (стрик-камера), 13 – ПЗС-регистратор

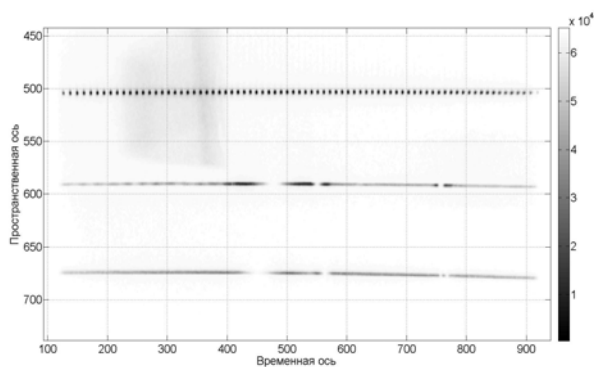


Рис. 5. Хронограмма передачи электрического сигнала с использованием схемы формирования информационных каналов, аналогичной квадратурной. Верхний ряд – оптические метки времени, средний и нижний ряды – информационные каналы

### Заключение

Показана система передачи аналоговых сигналов по оптоволоконной линии на расстояние до

1 км с использованием метода внешней модуляции и спектрального уплотнения DWDM. ДД системы передачи при регистрации однократного сигнала составляет не менее 200. Предложен метод определения ФП ММЦ непосредственно перед подачей информационного сигнала. Показана возможность построения системы передачи с использованием первого окна прозрачности оптического волокна при регистрации оптического излучения на стрик-камеру.

### Список литературы

1. Веретенников А. И., Даниленко К. Н., Средства диагностики однократного импульсного излучения. Москва: Сборник трудов НИИИТ, 1999.
2. С. Н. Cox III, Analog optical links. Theory and Practice, New York: Cambridge University Press, 2004.
3. W. R. Donaldson, C. Zhao, L. Ji, R. G. Roides, K. Miller, and B. Beeman A single-shot, multiwavelength electro-optic data-acquisition system for inertial confinement fusion applications (invited) // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83, p. 10D726.
4. B. Beeman, A. G. MacPhee, J. R. Kimbrough, G. A. Lacaille, M. A. Barrios, J. Emig, J. R. Hunter, E. K. Miller, W. R. Donaldson Mach-Zehnder Modulator performance using the Comet Laser facility and implications for use on NIF // Target Diagnostics Physics and Engineering for Inertial Confinement Fusion, edited by P. Bell, G. P. Grim, Proc. of SPIE. 2012. Vol. 8505, № 850507.
5. S. E. Caldwell, S. S. Han, J. R. Joseph, T. L. Petersen, and C. S. Young Burn history measurements in laser based fusion // Rev. Sci. Instrum. 1997. Vol. 68, N 1, p. 603–606.
6. R. M. Malone, H. W. Herrmann, W. Stoeffl, J. M. Mack, and C. S. Young Gamma bang time/reaction history diagnostics for the National Ignition Facility using 90° off-axis parabolic mirrors // Rev. Sci. Instrum., 2008. Vol. 79, p. 10E532.
7. A. M. McEvoy, H. W. Herrmann, C. J. Horsfield, C. S. Young, E. K. Miller, J. M. Mack, Y. Kim, W. Stoeffl, M. Rubery, S. Evans, T. Sedillo, and Z. A. Ali Gamma bang time analysis at OMEGA // Rev. Sci. Instrum., 2010 Vol. 81, p. 10D322.
8. E. K. Miller, R. Q. Abbott, I. McKenna, G. Macrum, D. Baker, V. Tran, E. Rodriguez, M. I. Kaufman, A. Tibbits, C. T. Silbernegel, T. B. Waltman, H. W. Herrmann, Y. H. Kim, J. M. Mack, C. S. Young, S. E. Caldwell, S. C. Evans, T. J. Sedillo, W. Stoeffl, E. Grafil, J. Liebman,

B. Beeman, P. Watts, A. Carpenter, C. J. Horsfield, M. S. Rubery, G. A. Chandler, J. A. Torres, and R. M. Smelser Mach-Zehnder recording systems for pulsed power diagnostics // *Rev. Sci. Instrum.*, 2012, Vol. 83, p. 10D719.

9. M. Lowry, G. Lancaster, R. T. Peterson, G. McWright, D. Nelson, and B. Kidd Precision Transfer Function Measurements of Integrated Optical

Modulators // *SPIE Vol 994 Optoelectronic Materials, Devices, Packaging, and Interconnects II* 1988, p. 205.

10. L. Ji «A Novel Electro-Optic Measurement System using Multiple Wavelengths» Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree Doctor of Philosophy, University of Rochester Rochester, New York 2011.