

## Система передачи аналоговых сигналов на основе модуляторов интенсивности по схеме интерферометра Маха-Цендера для диагностики быстропротекающих процессов

*В. И. Богомолов, Ю. В. Дмитриев, Н. Г. Игнатъев, К. Е. Коротков, П. С. Крапива, И. Н. Москаленко, В. А. Москвичев, С. С. Писков*

*Представлен макет системы передачи аналоговых сигналов сцинтилляционного детектора по волоконно-оптическим линиям связи на основе электрооптических модуляторов по схеме интерферометра Маха-Цендера с использованием технологии частотного уплотнения, оригинального метода определения функции пропускания и рабочей точки модуляторов. Для передачи сигнала одного детектора используются два модулятора, включенные по схеме, близкой к квадратурной. Представлено сравнение результатов передачи сигнала по волоконно-оптическому и коаксиальному кабелям.*

*Ключевые слова:* модулятор по схеме интерферометра Маха-Цендера, диагностика быстропротекающих процессов, внешняя модуляция оптического излучения.

### Введение

Исследование процессов горения термоядерного топлива в импульсной плазме, образующейся в экспериментах по инерциальному термоядерному синтезу, требует регистрации импульсов нано- и субнаносекундной длительности с временным разрешением на уровне десятков-сотен пикосекунд [1, 2]. Обычно соответствующий измерительный тракт состоит из детекторов, размещенных в непосредственной близости от исследуемого объекта или камеры взаимодействия, и тракта регистрации, включающего регистраторы, расположенные в экранированных помещениях, и линии передачи [3]. С целью минимизации искажений частотных характеристик исследуемых

сигналов и защиты от электромагнитных наводок и помех, в качестве линий передачи используются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) [4]. Кроме того, использование ВОЛС в качестве линий передачи позволяет сократить число требуемых каналов дорогостоящих быстродействующих регистраторов, используя метод т. н. временного уплотнения [5]. Низкое затухание в волокнах С-диапазона (третье окно прозрачности,  $\lambda = 1550$  нм) позволяет существенно увеличить расстояние передачи, а применение технологии частотного уплотнения DWDM – уменьшить требуемое число волоконных кабелей.

Целью данной работы является описание разработанного макета системы для передачи аналоговых сигналов сцинтилляционного детектора по волоконно-оптическим линиям связи на основе электрооптических модуляторов по схеме интерферометра Маха-Цендера, в котором использованы технологии частотного уплотнения, а также применен оригинальный метод определения функции пропускания и рабочей точки модуляторов.

### Макет системы

Для преобразования сигнала детектора в модуляцию интенсивности оптического излучения используется метод внешней модуляции [6, 7] с использованием электрооптических модуляторов по схеме интерферометра Маха-Цендера (ММЦ) [8]. Зависимость пропускания ММЦ от приложенного электрического сигнала (функция пропускания) имеет синусоидальную форму, поэтому с ро-

---

**Богомолов Владимир Игоревич**, ведущий инженер-исследователь.

**Дмитриев Юрий Владимирович**, начальник лаборатории.

**Игнатъев Николай Георгиевич**, начальник лаборатории, к.т.н.

**Коротков Кирилл Евгеньевич**, ведущий инженер-исследователь.

**Крапива Павел Сергеевич**, начальник группы.

**Москаленко Илья Николаевич**, инженер-исследователь.

**Москвичев Владимир Афанасьевич**, ведущий специалист.

**Писков Сергей Сергеевич**, инженер-исследователь.

Всероссийский НИИ автоматики им. Н. Л. Духова.

Россия, 127055, Москва, ул. Сушевская, 22.

Тел. 8 (499) 271-59-48, E-mail: vniiia@vniiia.ru

*Статья поступила в редакцию 2 июня 2017 г.*

---

© Богомолов В. И., Дмитриев Ю. В., Игнатъев Н. Г., Коротков К. Е., Крапива П. С., Москаленко И. Н., Москвичев В. А., Писков С. С., 2017

стом электрического сигнала на входе ММЦ, на оптическом выходе наблюдается последовательная смена минимумов и максимумов пропускания – аналог перехода между интерференционными полосами классического интерферометра Маха-Цендера. Для однозначного восстановления формы передаваемого по ВОЛС сигнала необходимо использовать пару ММЦ, образующих информационные каналы (ИК), настроенных таким образом, что переходы между полосами ММЦ происходят при различных значениях амплитуды передаваемого сигнала.

Синусоидальная форма пропускания ММЦ приводит к разной чувствительности ММЦ: вблизи точек квадратуры (середины функции пропускания) малое изменение амплитуды передаваемого сигнала приводит к максимальному изменению интенсивности оптического излучения на выходе ММЦ, вблизи экстремумов пропускания (минимума и максимума) – изменения оптического сигнала минимальны. Для компенсации этой особенности ММЦ оптимально формировать ИК по квадратурной схеме [9]: при отсутствии электрического сигнала один из модуляторов настраивается на точку квадратуры, другой – на экстремум пропускания. Т. к. полуволновое напряжение (соответствующее изменению минимума пропускания на максимум или наоборот) различных ММЦ отличается, то классическую квадратурную схему [10] с использованием двух ММЦ сформировать практически невозможно, и поэтому используется схема, близкая к квадратурной.

На рис. 1 показана схема макета системы передачи аналогового сигнала сцинтилляционного детектора с двумя ИК на основе ММЦ с использо-

ванием технологии частотного уплотнения DWDM и с регистрацией оптических сигналов в обоих ИК на один фотоприемник. Сигнал сцинтилляционного детектора с ФЭУ (1) делился между осциллографом (13) (с использованием для передачи сигнала коаксиального кабеля) и сигнальными входами ММЦ (7 и 8). На оптические входы ММЦ подавались оптические импульсы с плоской вершиной, сформированные из излучения лазерных диодов (ЛД) формата DWDM (3 и 4) при помощи ММЦ (15), настроенного на минимум пропускания. Длительность и форма оптических импульсов определялись сигналом с программируемого генератора (16). Для ввода излучения обоих ЛД в ММЦ (15) и разделения сформированных оптических импульсов по длинам волн использовались DWDM-разветвители с сохранением поляризации (5 и 6). Оптические импульсы, вершины которых были промодулированы сигналом с детектора, направлялись в один отрезок одномодового волокна при помощи DWDM-разветвителя (11). Для разделения импульсов по времени после одного из ММЦ была введена задержка (отрезок одномодового волокна), длина которой определялась длительностью оптических импульсов. Последовательность оптических импульсов регистрировалась фотодиодом (12) и осциллографом (13). Пропускание ММЦ при отсутствии сигнала на входе (т. е. рабочая точка ММЦ) настраивалось при помощи источников питания (9 и 10). Настройка рабочей точки ММЦ (15) также осуществлялась источником питания (на схеме не показан), минимум пропускания определялся по минимальному уровню нечетных гармоник в спектре сигнала с фотодетектора при подаче на вход ММЦ гармонического сигнала.

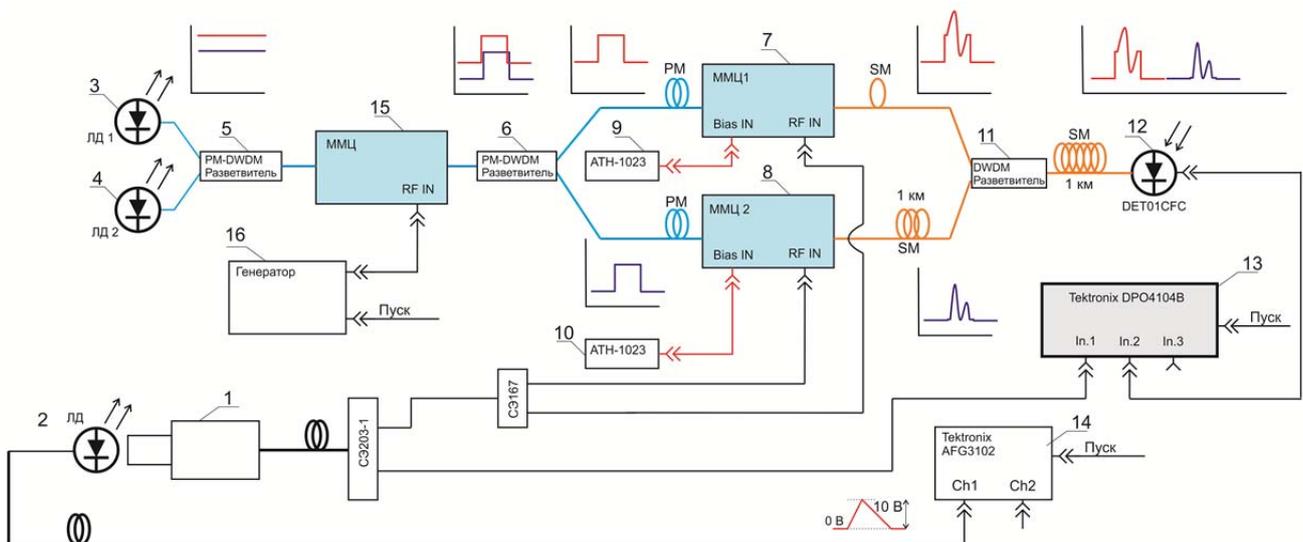


Рис. 1. Схема макета системы передачи аналогового сигнала сцинтилляционного детектора.

Для компенсации дрейфа рабочей точки ММЦ, вызванного, например, изменениями окружающих условий (температуры, влажности и т. п.), обычно используют специализированные контроллеры [7]. Процесс установки рабочей точки с использованием контроллера занимает достаточно продолжительное время и требует наличия оптического излучения на входе ММЦ. Кроме того, для восстановления формы передаваемого с использованием ММЦ сигнала необходимо обладать информацией о форме функции пропускания.

При отказе от контроллеров для установки рабочей точки и их замене на источники постоянного напряжения необходимо определять рабочую точку и функцию пропускания ММЦ непосредственно перед подачей на сигнальный вход ММЦ передаваемого сигнала [11]. Для этого на ЛД (2), установленный перед сцинтиллятором детектора (1), с генератора (14) подавался электрический сигнал с линейно нарастающим фронтом,

форма которого учитывала нелинейность светового хода ЛД (2). Плавная регулировка интенсивности ЛД позволяла сформировать электрический сигнал с линейно нарастающим фронтом в пределах линейного тока детектора (настроечный сигнал), который подавался на вход модулятора непосредственно перед приходом электрического сигнала от сцинтилляционного детектора, вызванного импульсом исследуемого излучения (информационного сигнала).

На рис. 2 приведен электрический сигнал с детектора, представляющий последовательность настроечного и информационного сигналов. На рис. 3 представлена осциллограмма зарегистрированных оптических аналогов электрического сигнала: первый импульс соответствует оптическому аналогу в ИК, настроенному на точку вблизи точки квадратуры, второй – в ИК, настроенному на точку вблизи максимума пропускания.

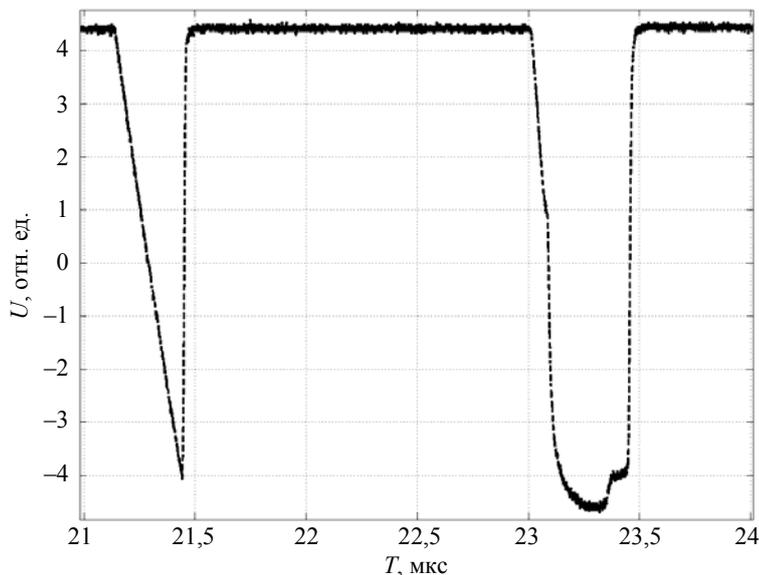


Рис. 2. Последовательность настроечного и информационного сигналов с детектора.

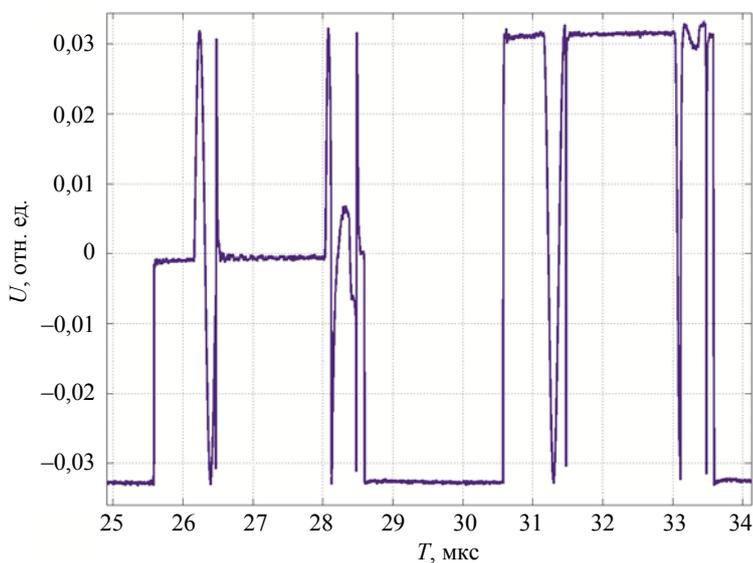


Рис. 3. Последовательность оптических аналогов электрического сигнала.

По известной форме настроечного сигнала и зарегистрированному отклику ММЦ на этот сигнал (т. е. по изменению интенсивности оптического излучения на выходе ММЦ) можно определить функцию пропускания и рабочую точку ММЦ, а затем восстановить форму передаваемого сигнала. На рис. 4 показаны электрический сигнал детектора, переданный по коаксиальному кабелю (кривая 1), и результат восстановления формы сигнала детектора, переданного по ВОЛС на ~1 км (кривая 2).

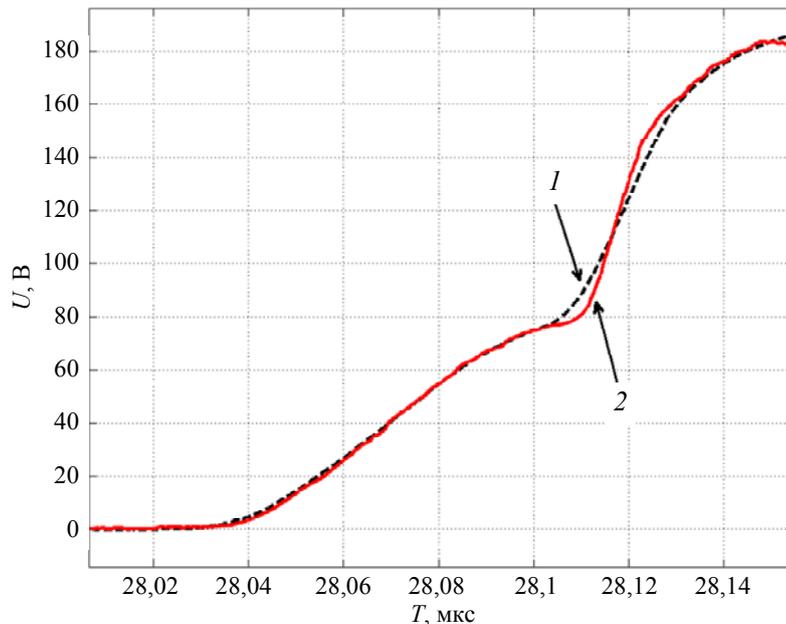


Рис. 4. Сравнение сигналов, переданных по коаксиальному кабелю и по ВОЛС с использованием метода внешней модуляции.

### Заключение

В работе представлен макет системы передачи широкополосных аналоговых сигналов сцинтилляционных детекторов с использованием внешней модуляции оптического излучения и технологии частотного уплотнения DWDM. Определение рабочей точки и функции пропускания модуляторов интенсивности по схеме интерферометра Маха-Цендера осуществляется непосредственно перед подачей на вход модулятора сигнала с детектора. Использование волоконно-оптических линий связи в качестве среды передачи позволяет минимизировать искажения высокочастотной части спектра передаваемого сигнала.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Garanin S. G. // *Physics-Uspexhi*. 2011. Vol. 54. No. 4. P. 434.
2. Caldwell S. E., Han S. S., Joseph J. R., Petersen T. L., Young C. S. // *Rev. Sci. Instrum.* 1997. Vol. 68. P. 603. doi: 10.1063/1.1147664
3. Веретенников А. И., Горбачев В. М., Предеин Б. А. Методы исследования импульсных излучений. — Москва, 1985.
4. Демьянович М. В., Казачков Ю. П. Волоконно-оптические устройства передачи информации (в сборнике «Средства диагностики однократного импульсного излучения», составители А. И. Веретенников, К. Н. Даниленко) — Москва: ИздАТ, 1999.
5. Donaldson W. R., Zhao C., Ji L., Roides R. G., Miller K., Beeman B. // *Rev. Sci. Instrum.* 2012. Vol. 83. P. 10D726.
6. Cox C. H. *Analog Optical Links. Theory and Practice.* — New York: Cambridge University Press, 2004.
7. *Broadband optical modulators. Science, Technology, and Applications / Edited by A. Chen, E. J. Murphy* — CRC Press, 2012. P. 531.
8. <https://photonics.ixblue.com/products-list/intensity-modulators>
9. Beeman B., MacPhee A. G., Kimbrough J. R., Lacaille G. A., Barrios M. A., Emig J., Hunter J. R., Miller E. K., Donaldson W. R. // *Proc. of SPIE*. 2012. Vol. 8505. P. 850507.
10. Kuznetsov A. P., Kozin G. I., Savelov A. S., Golubev A. A., Mutin T. Yu., Fertman A. D. *Instruments and Experimental Techniques*, 2006. Vol. 49. No. 2. P. 247.
11. Korotkov K. E., Ignatiev N. G., Krapiva P. S., Moskalenko I. N., Piskov S. S. / *International conference XVIII Khariton's topical scientific readings High energy density physics*, April 19–22, 2016. Abstracts. P. 39.

## Mach-Zehnder modulator based on the analog signal transmitting system for diagnostics of fast processes

V. I. Bogomolov, Yu. V. Dmitriev, N. G. Ignatiev, K. E. Korotkov, P. S. Krapiva,  
I. N. Moskalenko, V. A. Moskvichev, and S. S. Piskov

N. L. Dukhov All-Russian Research Institute of Automatics (VNIIA)  
22 Sushchevskaya str., Moscow, 127055, Russia  
E-mail: vniia@vniia.ru

Received June 2, 2017

**We have presented a prototype of the fiber-optic Mach-Zehnder modulator (MZM) based on the analog signal transmission system. Two modulators included in a configuration close to a 90° In phase and Quadrature (I/Q) are used to transmit the signal of a scintillation detector. The prototype uses the original method for determining the transmission function and the bias point of MZM's and DWDM. The results of signal transmission via fiber-optic and coaxial cables are compared and presented.**

**Keywords:** Mach-Zehnder modulator, diagnostics of fast processes, external modulation of optical radiation.

### REFERENCES

1. S. G. Garanin, *Physics-Uspokhi* **54** (4), 434 (2011).
2. S. E. Caldwell, S. S. Han, J. R. Joseph, T. L. Petersen, and C. S. Young, *Rev. Sci. Instrum.* **68**, 603 (1997); doi: 10.1063/1.1147664
3. A. I. Veretennikov, V. M. Gorbachev, and B. A. Predein, *Methods of Investigation of Pulse Processes* (Moscow, 1985) [in Russian].
4. M. V. Dem'ianovich and Yu. P. Kazachkov, *Fiber-Optic Data Transmission Devices* / in Book: *Diagnostic Facilities of a Single-Stage Pulse Radiation* Edited by A. I. Veretennikov, K. N. Danilenko (Moscow, IzdAt, 1999) [in Russian].
5. W. R. Donaldson, C. Zhao, L. Ji, R. G. Roides, K. Miller, and B. Beeman, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 10D726 (2012).
6. C. H. Cox, *Analog Optical Links. Theory and Practice* (New York: Cambridge University Press, 2004).
7. *Broadband Optical Modulators. Science, Technology, and Applications*. Edited by A. Chen, E. J. Murphy (CRC Press, 2012). P. 531.
8. <https://photonics.ixblue.com/products-list/intensity-modulators>
9. B. Beeman, A. G. MacPhee, J. R. Kimbrough, G. A. Lacaille, M. A. Barrios, J. Emig, J. R. Hunter, E. K. Miller, and W. R. Donaldson, *Proc. of SPIE* **8505**, 850507 (2012).
10. A. P. Kuznetsov, G. I. Kozin, A. S. Savelov, A. A. Golubev, T. Yu. Mutin, and A. D. Fertman, *Instruments and Experimental Techniques* **49** (2), 247 (2006).
11. K. E. Korotkov, N. G. Ignatiev, P. S. Krapiva, I. N. Moskalenko, and S. S. Piskov, in *Proc. International Conference: XVIII Khariton's Topical Scientific Readings on High Energy Density Physics* (April 19–22, 2016). P. 39.