

## МОДУЛЯТОР МАХА-ЦЕНДЕРА

В.Н. БУШИЛО, Н.В. ТАРЧЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 01 апреля 2020*

**Аннотация.** Современные высокоскоростные системы передачи сигналов по оптическим волокнам основаны на применении спектрального разделения каналов – технологии DWDM. В процессе проектирования данных систем необходимо выбрать оптимальный метод модуляции. Основным элементом формирования высокоскоростных сигналов является внешний оптический модулятор. Одним из вариантов исполнения внешнего модулятора является электрооптический модулятор Маха-Цендера.

**Ключевые слова:** высокоскоростные оптоволоконные системы передачи, модулятор Маха-Цендера, код NRZ, код RZ.

## Введение

Электрооптический модулятор Маха-Цендера предназначен для модуляции излучения мощного оптического лазера. Структурная схема данного модулятора представлена на рис. 1. Непрерывное излучение лазера  $E_0$  Y-разветвителем направляется по двум каналам (плечам интерферометра). Далее в каждом из каналов  $Y_1$  и  $Y_2$  непрерывное световое излучение попадает в фазовые модуляторы, которые позволяют изменять показатель преломления волновода пропорционально напряжению  $U_1$  и  $U_2$ . На выходе сдвинутые по фазе сигналы складываются в процессе интерференции, получая  $E_{out}$  [1].

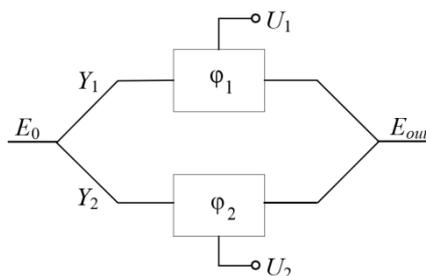


Рис. 1. Схема модулятора Маха-Цендера

Выходное значение  $E_{out}$  принимает следующий вид:

$$E_{out} = \frac{E_0}{2} \left( e^{j\varphi_1(t)} + e^{j\varphi_2(t)} \right),$$

где  $E_0$  – входное оптическое излучение;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – сдвиги фаз в верхнем  $Y_1$  и нижнем  $Y_2$  плечах.

Формирование фазового сдвига связано с изменением управляющего напряжения:

$$\varphi_1(t) = \frac{U_1}{V_{\pi 1}} \pi, \varphi_2(t) = \frac{U_2}{V_{\pi 2}} \pi.$$

Существует два режима работы модулятора Маха-Цендера. В режиме «push-push» в обоих плечах модулятора формируется одинаковый фазовый сдвиг  $\varphi(t) = \varphi_1(t) = \varphi_2(t)$

(например, при  $U_1(t) = U_2(t) = U(t)$  и  $V_{\pi 1} = V_{\pi 2} = V_{\pi}$ ), что позволяет осуществлять фазовую модуляцию. При этом амплитуда входного сигнала не изменяется. В режиме «push-pull» обоих плеча формируется одинаковый по величине, но разный по знаку фазовый сдвиг  $\varphi_1(t) = -\varphi_2(t)$  (например, при  $U_1(t) = -U_2(t) = U(t)/2$  и  $V_{\pi 1} = V_{\pi 2} = V_{\pi}$ ), что приводит к чистой амплитудной модуляции.

Параметры режимов работы модулятора Маха-Цендера обусловлены его передаточными характеристиками, представленными на рис. 2.

*a* *б*

Рис. 2. Передаточные функции электрического поля и мощности модулятора Маха-Цендера в различных режимах работы: *a* – квадратурная точка; *б* – точка минимальной трансмиссии

Для моделирования методов модуляции и кодирования выбрана среда MATLAB. Выбор параметров для высокоскоростных оптоволоконных систем передачи основан на рекомендациях МСЭ-Т, которые представлены в таблице.

**Показатели методов модуляции для высокоскоростных оптоволоконных систем передачи со скоростью 43 Гбит/с [2]**

Показатель	RZ с 33% заполнением	RZ с 50% заполнением	RZ с 67% заполнением (CS-RZ)
$f_{mod}$ (ГГц)	21,5	43	21,5
$V_{mod}$	$2V_{\pi}$	$V_{\pi}$	$2V_{\pi}$
$V_{bias}$	$V_{max}$	$V_{3dB}$	$V_{min}$
Фазовый сдвиг	0, 0, 0	0, 0, 0	0, $\pi$ , 0

### Формирование NRZ-сигнала

Код NRZ (Non Return to Zero – без возвращения к нулю) относится к безизбыточным кодам. В данном формате сигнал, соответствующий логической единице, формируется оптическим импульсом, длительность которого  $\tau$  равна периоду следования символов  $\tau = T = 1/B$  (где  $B$  – скорость передачи). Нулю соответствует отсутствие оптического сигнала или сигнал меньшего уровня.

Для данного вида кодирования оптических сигналов достаточно применения одного модулятора Маха-Цендера (MZ), работающего в режиме «push-pull». Схема формирования кода NRZ представлена на рис.3.

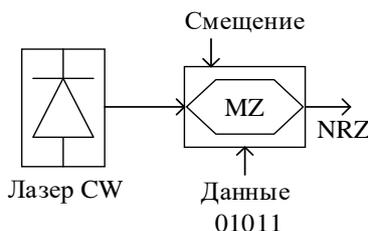


Рис. 3. Схема формирования NRZ-сигнала с использованием модулятора Маха-Цендера

На рис. 4 представлены результаты моделирования NRZ-сигнала в среде MATLAB видно из рис. 4 фаза выходного сигнала не изменяется, так как модулятор Маха-Цендера работает в режиме «push-pull». Инвертирование исходного информационного сигнала при формировании NRZ-сигнала обусловлено видом передаточной характеристики модулятора Маха-Цендера.

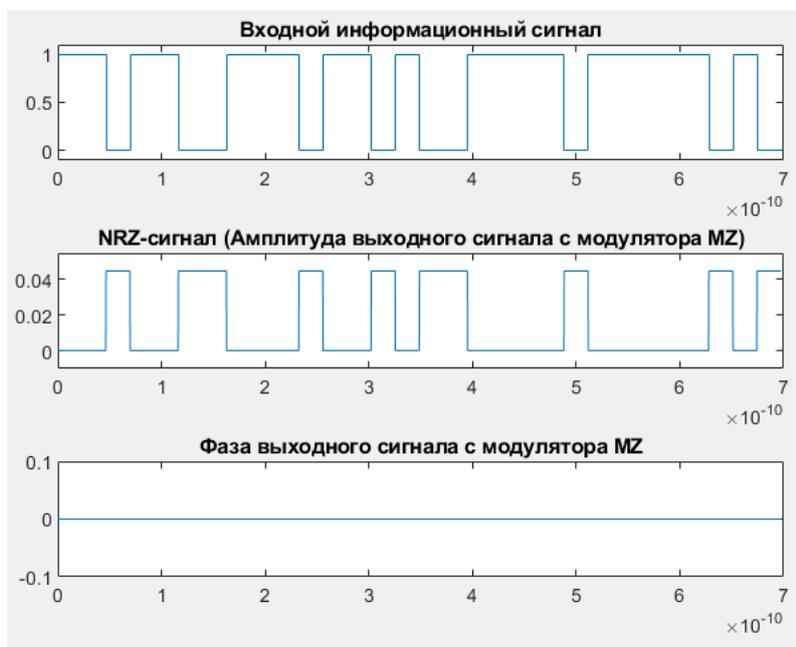


Рис. 4. Результаты моделирования NRZ-сигнала в среде MATLAB

### Формирование RZ-сигнала

Простейшим видом избыточного кода является код RZ (Return to Zero – с возвращением к нулю). В формате с RZ любой символ «1» представляет собой импульс, длительность которого  $T$  может варьироваться, но всегда  $\tau < T$  (например,  $\tau = T/2$ ) [3].

Схема формирования кода RZ представлена на рис. 5. Данная схема включает в себя формирование NRZ-сигнала с помощью первого модулятора Маха-Цендера. Полученный NRZ-сигнал поступает на вход второго модулятора Маха-Цендера, который в свою очередь с помощью управляющего сигнала  $U(t) = V_{\pi}/2 \cdot \sin(2\pi t \cdot f_{mod}) + V_{bias}$  вырезает RZ-импульсы с различным заполнением. Оба модулятора работают в режиме «push-pull».

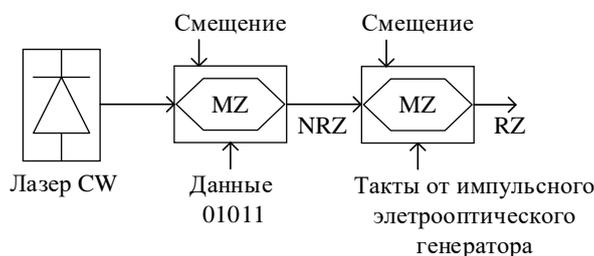


Рис. 5. Схема формирования RZ-сигнала с использованием модулятора Маха-Цендера

Существуют рабочие циклы при модуляции RZ-сигнала, которые составляют 1/3, 1/2 и 2/3 (соответственно, 33%, 50% и 67% заполнение). Формирование RZ-сигнала с различным заполнением осуществляется с помощью изменения параметров управляющего электрического сигнала на втором модуляторе Маха-Цендера.

На рис. 6 представлены результаты моделирования RZ-сигнала с различными заполнениями в среде MATLAB.

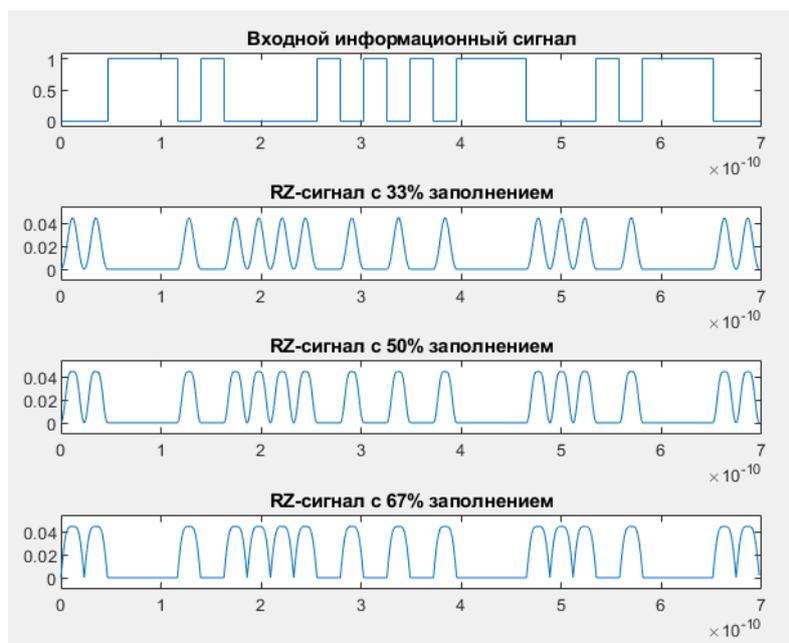


Рис. 6. Результаты моделирования RZ-сигнала в среде MATLAB

### Заключение

Модулятор Маха-Цендера позволяет осуществлять как фазовую, так и амплитудную модуляцию, что позволяет использовать его в качестве универсального базового элемента в схемах формирования различных форматов модуляции в современных высокоскоростных оптических системах передачи. Изменение параметров управляющего электрического сигнала на втором модуляторе Маха-Цендера позволяет формировать RZ-сигналы с различным заполнением.

## MACH-ZEHNDER MODULATOR

V.N. BUSHILO, N.V. TARCHENKO

**Abstract.** Modern high-speed systems for transmitting signals through optical fibers are based on the usage of spectral separation of channels – DWDM technology. In the process of designing these systems, it is necessary to choose the optimal modulation method. The main element in the formation of high-speed signals is an external optical modulator. One embodiment of an external modulator is the Mach-Zehnder electro-optical modulator.

*Keywords:* high-speed optical systems, Mach-Zehnder modulator, NRZ, RZ.

### Список литературы

1. Seimetz Matthias High-order modulation for optical fiber transmission // Springer. 2009.
2. Рекомендация МСЭ-Т серии G - Системы и среда передачи, цифровые системы и сети. Дополнение 39 - Рассмотрение вопросов расчета и проектирования оптических систем. 2016.
3. Щербаков В.В., Солодков А.Ф., Задерновский А.А. // Журнал: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2016. с.23