

# Расширенные форматы однополосной модуляции двухэлектродного модулятора Маха-Цендера

В.В. Щербаков<sup>1</sup>, А.Ф. Солодков<sup>1</sup>, А.А. Задерновский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Центр волоконно-оптических систем передачи информации»

<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет

**Аннотация:** представлено семейство новых форматов однополосной модуляции двухэлектродного электрооптического модулятора Маха-Цендера, обеспечивающих генерирование оптических сигналов, устойчивых к дисперсионной деградации мощности.

**Ключевые слова:** двухэлектродный модулятор Маха-Цендера, хроматическая дисперсия оптоволокна, однополосная модуляция интенсивности

## 1. Введение

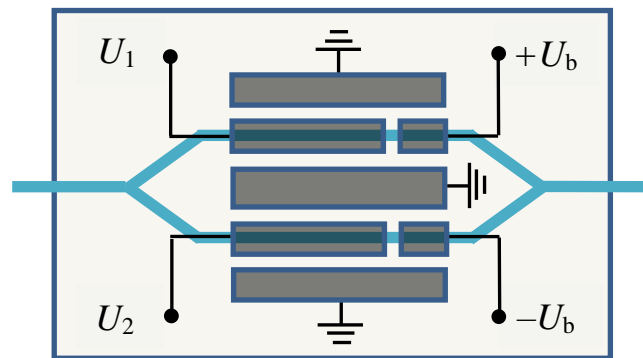
Основным недостатком аналоговых волоконно-оптических систем передачи информации, затрудняющим их использование в широкополосных системах связи, является неравномерность передаточной частотной характеристики. При определенных частотах происходит полное подавление сигнала модуляции интенсивности света. Такое поведение типично, например, для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) с внешней модуляцией интенсивности лазерного излучения и с использованием стандартного одномодового оптоволокна и одночастотного лазера с длиной волны 1550 нм. Оно обусловлено хроматической дисперсией групповой скорости электромагнитных волн в волокне. При транспортировке оптического сигнала по волокну различные спектральные компоненты модулированной электромагнитной волны распространяются, вследствие дисперсии, с разной скоростью и, таким образом, приобретают неодинаковые фазовые сдвиги. В результате, на выходе из волокна они складываются в иных, по сравнению с входным сигналом, фазовых соотношениях. Это приводит к искажению передаваемого сигнала, который формируется в результате интерференции волн, возникающих в результате биений каждой из боковых спектральных компонент с несущей электромагнитной волной. В частности, при определенных частотах модуляции эти волны оказываются в противофазе, что и приводит к подавлению выходного сигнала.

Для преодоления дисперсионной деградации используется специальный формат модуляции, обеспечивающий формирование однополосного оптического сигнала, содержащего только одну из боковых спектральных компонент вблизи частоты несущей. В отсутствие второй боковой компоненты, имеющейся электромагнитной волне биений просто не с чем интерферировать.

Стандартный способ [1] получения однополосного оптического сигнала модуляции интенсивности состоит в использовании двухэлектродного модулятора Маха-Цендера, на управляющие электроды которого подаются модулирующие сигналы напряжений с одинаковыми частотами и амплитудами, но сдвинутые на  $\pi/2$  по фазе. При этом, в качестве рабочей выбирается квадратурная точка передаточной функции модулятора. Однако, это не единственная возможность получить такой сигнал. В данной работе представлено семейство новых форматов модуляции двухэлектродного модулятора Маха-Цендера, обеспечивающих генерирование однополосных оптических сигналов.

## 2. Форматы модуляции двухэлектродного модулятора

Электрооптический модулятор на основе интерферометра Маха-Цендера может быть выполнен конструктивно так, чтобы иметь два отдельных управляющих электрода, на которые подаются сигнальные напряжения  $U_1$  и  $U_2$ . Это позволяет управлять электрическими полями в плечах интерферометра независимо друг от друга. Принципиальная схема такого двухэлектродного модулятора показана на рисунке 1. Для достижения максимального электрооптического эффекта в качестве подложки используются кристаллы ниобата лития Z-среза. Выбор рабочей точки модулятора достигается с помощью постоянного напряжения смещения  $U_b$ , которое вносит дополнительный контролируемый сдвиг фаз между световыми волнами в плечах интерферометра. Для обеспечения смещения обычно используется отдельная система электродов.



**Рисунок 1.** Принципиальная схема модулятора Маха-Цендера с двумя управляющими электродами

Пусть на сигнальные электроды подаются модулирующие напряжения  $U_1 = U_0 \cos(\omega_m t + \varphi_{m1})$  и  $U_2 = U_0 \cos(\omega_m t + \varphi_{m2})$  с частотой  $\omega_m$ , амплитудой  $U_0$  и начальными фазами  $\varphi_{m1}$  и  $\varphi_{m2}$ . Выбор рабочей точки модулятора осуществляется посредством приложения к электродам одинакового постоянного напряжения  $U_b$  с противоположной полярностью. Такое напряжение вносит одинаковые по модулю, но противоположные по знаку сдвиги фаз в каждое плечо интерферометра. В результате, фазы электромагнитных волн в плечах интерферометра записываются как

$$\varphi_1 = \varphi_0 + \pi U_b / 2U_\pi + \pi U_1 / 2U_\pi \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \varphi_0 - \pi U_b / 2U_\pi + \pi U_2 / 2U_\pi, \quad (2)$$

где  $U_\pi$  – полуволновое напряжение модулятора, а электромагнитная световая волна на выходе из модулятора имеет вид

$$E = E_0 \exp i(\omega_0 t + \varphi_0) \cos \frac{\pi}{2} \left( \frac{U_b}{U_\pi} + \frac{U_1 - U_2}{2U_\pi} \right) \exp \frac{i\pi}{4} \frac{U_1 + U_2}{U_\pi} \quad (3)$$

Спектральное представление волны (3) можно записать в виде суммы

$$E = E_0 e^{i(\omega_0 t + \varphi_0)} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n e^{in(\omega_m t + \frac{\varphi_{m1} + \varphi_{m2}}{2})} \quad (4)$$

с коэффициентами

$$C_n = i^n J_n(\pi u_0/2) \cos\left(\frac{\pi u_b}{2} + n \frac{\varphi_{m1} - \varphi_{m2}}{2}\right), \quad (5)$$

где введены нормированные переменные  $u_b = U_b/U_\pi$  и  $u_0 = U_0/U_\pi$  и  $J_n$  это функция Бесселя первого рода порядка  $n$ . Соответственно, спектральное представление сигнала модуляции интенсивности света на выходе из модулятора имеет вид

$$P_{out} = \frac{P_0}{2} \left[ 1 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} i^n J_n\left(\pi u_0 \sin \frac{\varphi_{m1} - \varphi_{m2}}{2}\right) \cos\left(\pi u_b + n \frac{\pi}{2}\right) e^{in\left(\omega_m t + \frac{\varphi_{m1} + \varphi_{m2}}{2}\right)} \right]. \quad (6)$$

Из (5) легко видеть, что условие того, что в спектре электромагнитной волны пропадает полоса  $-1$  выглядит как

$$u_b - \frac{\varphi_{m1} - \varphi_{m2}}{\pi} = (2m + 1), \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7)$$

Принимая во внимание, что интервал напряжения смещения  $-1 \leq u_b \leq 1$  исчерпывает все разновидности рабочих точек модулятора, а интервал  $-1 \leq (\varphi_{m1} - \varphi_{m2})/\pi \leq 1$  даёт все возможные разности фаз модулирующих напряжений, получаем, вместо (7), условие

$$\left| u_b - \frac{\varphi_{m1} - \varphi_{m2}}{\pi} \right| = 1. \quad (8)$$

Аналогично, условие того, что пропадает полоса  $+1$  определяется равенством

$$\left| u_b + \frac{\varphi_{m1} - \varphi_{m2}}{\pi} \right| = 1. \quad (9)$$

Важно отметить, что при  $u_b = 0$  и выполнении указанных выше условий, вместе с гармониками  $+1$  и  $-1$  пропадают и вообще все нечетные гармоники. При  $u_b = \pm 1$  и выполнении условий (8) или (9) должно быть  $\varphi_{m1} - \varphi_{m2} = 0$  и модулирование интенсивности света не происходит. Эти крайние случаи надо исключить из рассмотрения.

В таблице 1 представлены примеры однополосных форматов модуляции, полученных на основе требований (8), (9). Некоторые из них хорошо известны. Так, формат с  $u_b = \pm 1/2$ ,  $(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})/\pi = \pm 1/2$  исторически был первым предложенным однополосным оптическим форматом модуляции [1]. Другой формат с  $u_b = \pm 1/3$ ,  $(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})/\pi = \pm 2/3$  был предложен относительно недавно [2].

Таблица 1. Примеры форматов модуляции

Номер гармоники с амплитудой равной нулю $n$	Нормированное напряжение смещения $u_b = U_b/U_\pi$	Нормированная разность фаз модулирующих напряжений $(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})/\pi$
	$-1/2$	$+1/2$
	$+1/2$	$-1/2$
$n = -1$	$-1/3$	$+2/3$
	$+1/3$	$-2/3$
	$-2/3$	$+1/3$

	+2/3	-1/3
	-1/2	-1/2
	+1/2	+1/2
$n = +1$	-1/3	-2/3
	+1/3	+2/3
	-2/3	-1/3
	+2/3	+1/3

Не все форматы, включенные семейство (8), (9) являются равноценными. Из (6), например, видно, что выбор квадратурной рабочей точки с  $u_b = \pm 1/2$ , расположенной на линейном участке передаточной функции модулятора, приводит к подавлению всех четных гармоник сигнала модуляции интенсивности. Тем самым, нелинейные искажения сигнала на выходе из модулятора оказываются минимальными. Другим интересным примером [2] служит формат  $u_b = -1/3$ ,  $(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})/\pi = +2/3$  или  $u_b = +1/3$ ,  $(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})/\pi = -2/3$ , при котором в электромагнитной волне пропадает не только полоса  $n = -1$ , но и  $n = +2$  (рисунок 2а). А при выборе следующих параметров модуляции  $u_b = -1/3$ ,  $(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})/\pi = -2/3$  или  $u_b = +1/3$ ,  $(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})/\pi = +2/3$  пропадают одновременно полосы  $n = +1$  и  $n = -2$  (рисунок 2б).

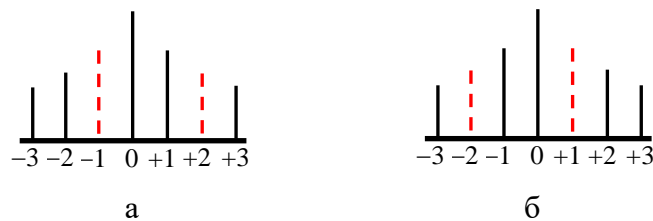


Рисунок 2. Спектр электромагнитной световой волны

Видно, что в этом случае модуляция становится «однополосной» не только по основной, но и по второй гармонике. В результате, следует ожидать уменьшения нелинейных искажений сигнала при его транспортировке по оптоволокну.

### 3. Транспортировка оптического сигнала по волокну

Интенсивность оптического сигнала на выходе из волокна длиной  $L$  имеет вид спектральной суммы [3] (без учета затухания в волокне)

$$P_s = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} P_n e^{in[\omega_m(t-L/u) + \frac{\varphi_{m1} + \varphi_{m2}}{2}]} \quad (10)$$

с коэффициентами

$$P_n = (-1)^n \frac{P_0}{2} \left\{ J_n(\pi u_0 \sin n\theta) \cos \frac{n(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})}{2} + \frac{1}{2} e^{i\pi u_b} J_n \left[ \pi u_0 \sin \left( n\theta + \frac{(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})}{2} \right) \right] + \frac{1}{2} e^{-i\pi u_b} J_n \left[ \pi u_0 \sin \left( n\theta - \frac{(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})}{2} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

где  $u$  - групповая скорость сигнала в оптоволокну и

$$\theta = \pi c(\omega_m/\omega_0)^2 DL \quad (12)$$

это параметр транспортировки сигнала по волокну с коэффициентом дисперсии  $D$ .

Приведем некоторые примеры. Рассмотрим стандартный однополосный формат модуляции:  $\varphi_{m1} = \varphi_m$ ,  $\varphi_{m2} = \varphi_m - \pi/2$   $u_b = \pm 1/2$ . Оптический сигнал интенсивности света (6) на выходе из модулятора описывается на частоте модуляции функцией (при  $\pi u_0 < 1$ )

$$P_{out} = \frac{P_0}{2} \left[ 1 \mp \frac{\pi u_0}{\sqrt{2}} \cos\left(\omega_m t + \varphi_m + \frac{\pi}{4}\right) \right]. \quad (13)$$

При  $\varphi_{m1} = \varphi_m$ ,  $\varphi_{m2} = \varphi_m - 2\pi/3$   $u_b = \pm 1/3$  сигнал на выходе из модулятора имеет вид ( $\pi u_0 < 1$ )

$$P_{out} = \frac{3P_0}{4} \left[ 1 \mp \frac{\pi u_0}{2} \cos\left(\omega_m t + \varphi_m + \frac{\pi}{6}\right) \right]. \quad (14)$$

Используя (11), получаем, что после транспортировки по оптоволокну длиной  $L$  сигналы (13) и (14) трансформируются, соответственно, к виду (при  $\pi u_0 < 1$ )

$$P_s = \frac{P_0}{2} \left\{ 1 \mp \frac{\pi u_0}{\sqrt{2}} \cos[\omega_m(t - L/u) + \varphi_m + \frac{\pi}{4} \mp \theta] \right\}, \quad (15)$$

$$P_s = \frac{3P_0}{4} \left\{ 1 \mp \frac{\pi u_0}{2} \cos[\omega_m(t - L/u) + \varphi_m + \frac{\pi}{6} \mp \theta] \right\}. \quad (16)$$

Сравнение (13) с (15) и (14) с (16) показывает, что передаваемый оптический сигнал модуляции интенсивности света не испытывает искажений. Соответствующие сигналы на входе и на выходе из оптоволокну отличаются только фазой.

#### 4. Заключение

Оптические сигналы модуляции интенсивности, в спектре которых отсутствует одна из ближайших к несущей боковых полос, не подвержены дисперсионной деградации мощности. Это делает их чрезвычайно привлекательными для систем широкополосной оптической связи. В данной работе установлено семейство форматов модуляции двухэлектродного модулятора Маха-Цендера, обеспечивающих генерирование однополосных оптических сигналов. Это семейство включает в себя как старые и хорошо известные, так и новые форматы модуляции. Приведенные примеры расчетов показывают отсутствие искажений, связанных с дисперсионным подавлением мощности сигнала.

#### Список литературы

1. Smith, G. H. Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators / G. H. Smith, [at al.] // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1997. – Vol. 45. – No 8. – P. 1410-1415.
2. Min Xue. Optical single-sideband modulation based on a dual-drive MZM and a 120° hybrid coupler / Min Xue, [at al.] // Journal of lightwave technology. – 2014. - Vol. 32. -No. 19. –P. 3317-3323.
3. Щербаков В. В. Передача сигналов модуляции интенсивности света в аналоговых волоконно-оптических линиях связи / В. В. Щербаков, [и др.] // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии (РЭНСИТ). – 2016. - Т. 8. - № 1. - С. 9-24.