

РАСШИРЕННЫЕ ФОРМАТЫ МОДУЛЯЦИИ ДВУХЭЛЕКТРОДНОГО МОДУЛЯТОРА МАХА-ЦЕНДЕРА

Щербаков В.В.^{1*}, Солодков А.Ф.¹, А.А. Задерновский²

¹АО «Центр волоконно-оптических систем передачи информации», г. Москва

²МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), г. Москва

*E-mail: vosp@bk.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16185

Введение

Основным недостатком протяженных аналоговых волоконно-оптических систем передачи информации является неравномерность передаточной частотной характеристики. При определенных частотах происходит практически полное подавление сигнала модуляции интенсивности света. Оно обусловлено хроматической дисперсией групповой скорости электромагнитных волн в волокне. Детектируемый сигнал интенсивности света на частоте модуляции формируется, в первом приближении, как результат интерференции двух волн, возникающих при биении боковых спектральных компонент первого и минус первого порядка с несущей электромагнитной волной. Из-за дисперсии, указанные волны биений приобретают на выходе из волокна неодинаковые фазовые сдвиги, величина которых зависит от частоты модуляции. В частности, при определенных частотах модуляции эти волны оказываются в противофазе, что и приводит к подавлению выходного сигнала.

Для преодоления дисперсионной деградации мощности используется специальный формат модуляции, обеспечивающий генерирование однополосного оптического сигнала, содержащего только одну из двух боковых спектральных компонент вблизи частоты несущей. В отсутствие второй боковой компоненты, имеющейся единственной электромагнитной волне биений просто не с чем интерферировать. Другая возможность это использование формата модуляции с двумя боковыми спектральными полосами и подавленной несущей. В этом случае нет двух волн биений боковых спектральных полос с несущей электромагнитной волной, ввиду отсутствия последней. Соответственно, в оптоволокне формируется одна волна биений между верхней и нижней боковыми полосами. Частота этой волны равна удвоенной частоте модуляции. Из-за отсутствия парной волны деструктивная интерференция, ответственная за дисперсионную деградацию мощности сигнала, оказывается невозможной. В данной работе наглядно продемонстрирована передача таких сигналов по оптоволокну без амплитудных дисперсионных искажений. Обсуждаются возможные фазовые искажения этих сигналов. Представлено семейство новых форматов однополосной модуляции двухэлектродного модулятора Маха-Цендера.

Форматы однополосной модуляции

Стандартный способ 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.

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 ω_m , амплитудой U_0 и начальными фазами φ_{m1} и φ_{m2} . Выбор рабочей точки модулятора осуществляется посредством приложения к электродам одинакового постоянного напряжения смещения U_b с противоположной полярностью. Такое напряжение вносит одинаковые по модулю, но противоположные по знаку сдвиги фаз в каждое плечо интерферометра.

Спектральное представление электромагнитной волны на выходе из модулятора можно записать в виде суммы

$$E = E_0 e^{i(\omega_b t + \varphi_0)} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n e^{in(\omega_m t + \frac{\varphi_{m1} + \varphi_{m2}}{2})} \quad (1)$$

с коэффициентами

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

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

$$P_{\text{out}} = \frac{P_0}{2} \left[1 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} i^n J_n \left(\pi u_0 \sin \frac{\varphi_{m1} - \varphi_{m2}}{2} \right) \cos \left(\pi u_b + n \frac{\pi}{2} \right) e^{in \left(\omega_m t + \frac{\varphi_{m1} + \varphi_{m2}}{2} \right)} \right] \quad (3)$$

Условие того, что в спектре электромагнитной волны пропадает полоса $n = \pm 1$ выглядит как

$$\left| u_b \pm \frac{\varphi_{m1} - \varphi_{m2}}{\pi} \right| = 1. \quad (4)$$

В таблице 1 представлены примеры однополосных форматов модуляции. 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 разница фаз модулирующих напряжений $(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})/\pi$
$n = -1$	$\pm 1/2$	$\mp 1/2$
	$\pm 1/3$	$\mp 2/3$
	$\pm 2/3$	$\mp 1/3$
$n = +1$	$\pm 1/2$	$\pm 1/2$
	$\pm 1/3$	$\pm 2/3$
	$\pm 2/3$	$\pm 1/3$

Не все форматы, включенные семейство (4) являются равноценными. Из (3), например, видно, что выбор квадратурной рабочей точки с $u_b = \pm 1/2$ 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 $n = +2$. 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 $n = -2$. 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.

Рассмотрим, например, формат $\varphi_{m1} = \varphi_m$, $\varphi_{m2} = \varphi_m + 2\pi/3$ $u_b = \pm 1/3$. Сигнал модуляции интенсивности (3) на выходе из модулятора (на входе в оптоволокно) принимает форму

$$P_{\text{out}} = \frac{3P_0}{4} \left[1 \mp \frac{\pi u_0}{2} \cos \left(\omega_m t + \varphi_m - \frac{\pi}{6} \right) \right], \quad (5)$$

а на выходе из волокна длиной L [3]

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

где u - групповая скорость сигнала в оптоволокне и $\theta = \pi(\omega_m/\omega_0)^2 DL$ - параметр транспортировки сигнала по волокну с коэффициентом дисперсии D . Видно, что передаваемый оптический сигнал модуляции интенсивности света не испытывает амплитудных искажений. Соответствующие сигналы на входе и на выходе из оптоволокна отличаются только фазой.

Форматы модуляции с подавленной несущей

Если в качестве рабочей использовать точку минимума передаточной функции модулятора, то при различных фазах управляющих напряжений модулятора получаем семейство форматов амплитудной модуляции с подавленной несущей. Так, при выборе рабочих точек с $u_b = \pm 1$ амплитуда

C_0 , согласно (2), оказывается равной нулю, а оптический сигнал модуляции интенсивности (3) содержит только четные гармоники и при малой глубине модуляции $\pi u_0 < 1$ принимает вид

$$P_{\text{out}} = \frac{P_0}{2} \left(\frac{\pi u_0}{2} \right)^2 \sin^2 \frac{(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})}{2} \left[1 - \cos 2 \left(\omega_m t + \frac{\varphi_{m1} + \varphi_{m2}}{2} \right) \right]. \quad (7)$$

В качестве примера рассмотрим формат модуляции $\varphi_{m1} = \varphi_m$, $\varphi_{m2} = \varphi_m \pm \pi$, $u_b = \pm 1$. В этом случае двухэлектродный модулятор работает в режиме балансного, а спектр соответствующей электромагнитной волны (1) с коэффициентами (2) содержит только нечетные гармоники. На выходе из модулятора (на выходе в оптоволокно) получаем следующий сигнал модуляции интенсивности света

$$P_{\text{out}} = \frac{P_0}{2} \left(\frac{\pi u_0}{2} \right)^2 [1 + \cos 2(\omega_m t + \varphi_m)], \quad (8).$$

а на выходе из волокна [3]

$$P_s = \frac{P_0}{2} \left(\frac{\pi u_0}{2} \right)^2 \{1 + \cos 2[\omega_m(t - L/u) + \varphi_m]\}. \quad (9)$$

Сравнение сигналов и на входе (8) и на выходе (9) из волокна говорит о том, что оптические сигналы с подавленной несущей передаются без амплитудных искажений. Более того, выходной сигнал (9) не зависит от параметра транспортировки θ , то есть от дисперсионных свойств оптоволокна.

Заключение

В статье рассмотрены специальные форматы модуляции интенсивности света двухэлектродного модулятора Маха-Цендера, устойчивые к дисперсионной деградации мощности. Среди них форматы оптической однополосной модуляции и форматы модуляции с подавленной оптической несущей. Установлено семейство новых форматов однополосной модуляции двухэлектродного модулятора Маха-Цендера. На нескольких примерах обсуждается сравнительная ценность различных форматов модуляции этого семейства. Получены явные выражения для оптических сигналов однополосной модуляции и сигналов модуляции с подавленной несущей. Наглядно продемонстрирована передача таких сигналов без дисперсионной деградации мощности. Спектральные амплитуды этих сигналов на входе и на выходе из оптоволокна одинаковы по величине (без учета затухания в волокне). Другими словами показано, что сигналы однополосной модуляции и сигналы модуляции с подавленной несущей устойчивы к амплитудным искажениям. Что касается фазовых искажений, то указанные сигналы ведут себя по-разному.

Сигналы однополосной модуляции на входе (5) и на выходе (6) из волокна отличаются друг от друга по фазе на величину, содержащую параметр транспортировки θ . Так как этот параметр является квадратичной функцией частоты модуляции, то фазо-частотная характеристика волоконно-оптической линии связи оказывается нелинейной. Это приводит к нарушению фазовых соотношений между спектральными компонентами передаваемого сигнала и его искажению на выходе из волокна.

Выходной оптический сигнал модуляции с подавленной несущей (9) не зависит от параметра транспортировки θ . Поэтому такой сигнал оказывается устойчивым не только к амплитудным, но и к фазовым искажениям. При этом, использование такого формата модуляции сопровождается удвоением частоты при конверсии электрического сигнала в оптический.

Литература

1. Smith G., Novak D., Ahmed Z., *IEEE Transactions on microwave theory and techniques* 45(8), 1410-1415 (1997)
2. Min Xue, Shilong Pan, Yongjiu Zhao, *Journal of lightwave technology* 32(19), 3317-3323 (2014)
3. Щербаков В.В., Солодков А.Ф., Задерновский А.А., *РЭНСИТ* 11(2), 161-176 (2019)