

УДК 681.7.068

В.М. Афанасьев

Коломенский институт (филиал) Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ), Коломна, Россия

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР ПО СХЕМЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА–ЦЕНДЕРА

Проведен обзор устройства электрооптических модуляторов Маха–Цендера, методов модуляции и анализ спектра оптических сигналов. Целью работы является определение оптимальных параметров модуляции и обоснование новых возможностей систем с модуляцией аналоговой и цифровой информации. Показана возможность модуляции фазы сигнала в схеме с одним модулятором Маха–Цендера. Обосновано получение фазового сигнала в датчиках, использующих интерференционные методы на эффекте Саньяка.

Ключевые слова: системы оптической связи, электрооптический модулятор Маха–Цендера, электрооптический квадратурный модулятор, амплитудная и фазовая модуляция, интерферометрические волоконно-оптические гироскопы.

V.M. Afanas'ev

Kolomna Institute (branch) of Moscow State Engineering University (MAMI),
Kolomna, Russian Federation

THE ELECTRO-OPTICAL MODULATOR ACCORDING TO THE SCHEME OF THE INTERFEROMETER OF MACH–ZEHNDER

The paper presents an overview of the design of electro-optical modulators of the Mach–Zehnder, modulation techniques and spectrum analysis of optical signals. The aim of this work is to determine the optimal modulation parameters and the rationale for the new capabilities of the systems with modulated analog and digital information. The possibility of modulating the phase of a signal in circuit with one modulator of the Mach–Zehnder. Justified by obtaining the phase of the signal sensors using interferometric techniques on the Sagnac effect.

Keywords: optical communication systems, the electro-optical modulator of Mach–Zehnder, electro-optical quadrature modulator, amplitude and phase modulation, interferometric fiber-optic gyroscopes.

Введение

В аналоговой электронике и радиотехнических системах модуляция осуществляется с помощью транзистора, работающего в нелинейном режиме. Получение сигналов с амплитудной и фазовой (угловой)

модуляцией связано с операцией перемножения двух сигналов. На выходе транзисторного преобразователя спектр сигнала содержит комбинационные частоты, исключение которых из спектра модулированного сигнала вызывает трудности. Преобразование сигналов в оптических устройствах имеет ряд преимуществ. Основные – линейные и более стабильные характеристики преобразований сигналов.

В системах оптической связи первым и самым распространенным является бинарный амплитудный формат модуляции. Его получают путем прямой модуляции тока накачки полупроводникового лазера. При прямой модуляции изменяется выходная мощность. Существенное увеличение возможностей оптических систем связи позволяет использовать передатчики на основе полупроводниковых лазеров с непрерывной накачкой и внешней модуляцией. Большие возможности предоставляют электрооптические модуляторы по схеме интерферометра Маха–Цендера (MMZ, ИМЦ).

Электрооптические модуляторы Маха–Цендера (Mach–Zehnder) применяются в аналоговых и цифровых системах коммуникации, волоконно-оптических датчиках. Использование электрооптических модуляторов позволяет существенно улучшить технические характеристики трактов передачи аналоговых и цифровых сигналов, обеспечить электромагнитную совместимость линий передачи информации. Кроме того, они могут применяться в радиотехнических устройствах.

1. Электрооптические модуляторы по схеме интерферометра Маха–Цендера

Электрооптический модулятор на базе интерферометра Маха–Цендера¹ на дискретных элементах приведен на рис. 1 [1]. Он предназначен для модуляции излучения мощного лазера. Исходный монохроматический световой пучок I попадает на первый делитель светового потока 1 и делится на два одинаковых пучка I_1 и I_2 . Эти два пучка направляются в электрооптические элементы 3 из монокристаллического материала с линейным электрооптическим эффектом, в которых при подаче на электроды 4 управляющего напряжения происходит изменение показателя преломления. Благодаря этому световые пучки

¹ Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха–Цендера: пат. № 2405179 Рос. Федерация / Д.Р. Древяко, Ю.А. Зюрюкин. Опубл. 27.11.2010.

приобретают взаимную разность фаз φ . Световые пучки после электрооптических элементов 3 попадают в соединитель разделенных пучков света (полупрозрачное зеркало 2) и затем на фотоприемник (ФП).

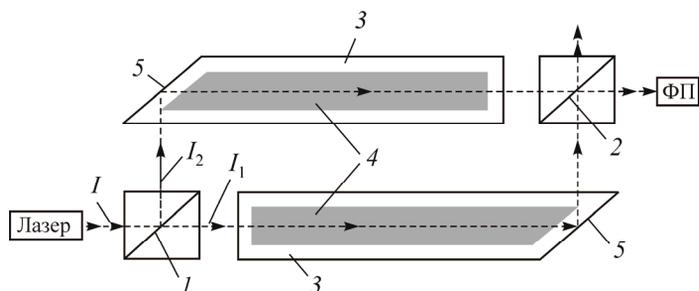


Рис. 1. Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха–Цендера на дискретных элементах: 1 – делитель светового потока на два пучка света; 2 – соединитель разделенных пучков света; 3 – электрооптические элементы; 4 – электроды; 5 – отражающие элементы; ФП – фотоприемник; I_1 и I_2 – световые пучки в каналах модулятора

Без модуляции сигнал на выходе фотоприемника с линейной характеристикой пропорционален интенсивности падающего на него излучения:

$$I = I_0 + I_m \cos \varphi ,$$

где I_0 и I_m – постоянная и переменная составляющие интенсивности излучения; φ – разность фаз интерферирующих пучков I_1 и I_2 . В случае равенства интенсивностей I_1 и I_2 будут равны $I_0 = I_m$. Тогда $I = I_m(1 + \cos \varphi)$, а напряжение фотоприемника U равно

$$U = U_m(1 + \cos \varphi) .$$

Типичный электрооптический модулятор Маха–Цендера в интегральном исполнении схематично представлен на рис. 2 [2]. В качестве материала для его создания используют ниобат лития (LiNbO_3). На поверхности этого материала создают необходимую световодную конфигурацию. Непрерывное излучение лазера I_0 Y-разветвителем направляется по двум каналам (плечам интерферометра). Между световодами напыляются электроды.

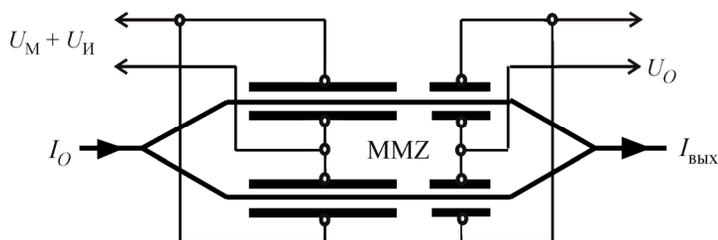


Рис. 2. Схема электрооптического модулятора Маха-Цендера в интегральном исполнении: I_0 , $I_{\text{вых}}$ – лазерное излучение на входе и выходе модулятора; U_M – модулирующее напряжение, $U_M = U_m \sin \omega t$; $U_{\text{И}}$ – информационное напряжение; U_O – напряжение смещения рабочей точки

На первую группу электродов подают модулирующее напряжение $U_M = U_m \sin \omega t$ и напряжение, несущее информацию, $U_{\text{И}}$ (аналоговый или бинарный сигнал). На вторую группу электродов подают напряжение смещения рабочей точки U_O . Электрический сигнал вызывает изменение показателя преломления светового канала. Напряжения приложены так, чтобы ускорить движение лазерного излучения в одном плече и замедлить в другом. Это позволяет уменьшить в два раза величины управляющих напряжений. Лазерное излучение в каналах распространяется с разными скоростями и приобретает разность фаз φ . Затем их сложение Y-соединителем вызывает на выходе интерференционное изменение мощности излучения.

Компания Photline Technologies (Франция) производит электрооптические модуляторы Маха-Цендера на основе кристаллов ниобата лития LiNbO_3 для длин волн лазера 800, 1060, 1300, 1550 и 2000 нм [3]. Диапазон модуляции – от низких частот до 40 ГГц. Скорость модуляции цифровых сигналов – 12,5–40 Гбит/с. Полуволновое напряжение – 2,5–9,5 В. Вносимые потери лазерного излучения – 2,7–6 дБ. Выпускаются амплитудные электрооптические модуляторы Маха-Цендера (модуляторы интенсивности): аналоговые модуляторы серии MXAR-LN, цифровые модуляторы серии MX-LN и двойной параллельный модулятор MXIQ-LN. Модуляторы имеют электроды для смещения рабочей точки. Двойной параллельный модулятор MXIQ-LN-40 состоит из двух подключенных параллельно модуляторов Маха-Цендера. Он обеспечивает на выходе следующие форматы модуляции: DQPSK, OFDM, QAM и SSB [3–5].

В России интегрально-оптические ИМЦ для длины волны 1550 нм с полуволновым напряжением 3,2 В производит Пермская научно-производственная приборостроительная компания [6].

2. Зависимость выходной оптической мощности модулятора от приложенного к электродам напряжения

Зависимость выходной мощности лазерного излучения модулятора $I_{\text{вых}}$ от приложенного к электродам напряжения U (при $U_0 = 0$) имеет вид

$$I_{\text{вых}} = 0,5I_0 \left(1 + \cos \frac{\pi U}{U_\pi} \right) = 0,5I_0 (1 + \cos \varphi), \quad (1)$$

где I_0 – входная мощность излучения лазера с учетом потерь в Y-разветвителях; U – напряжение, подаваемое на электроды; U_π – полуволновое напряжение, при котором $\varphi = \pi$; $\varphi = \frac{\pi U}{U_\pi}$ – разность фаз интерферирующих пучков.

Зависимость выходной оптической мощности идеального модулятора от разности фаз φ интерферирующих лазерных пучков приведена на рис. 3. Точка 1 соответствует рабочей точке без напряжения смещения. Подачей на электрооптический элемент модулятора постоянного напряжения смещения рабочей точки U_0 , равного $\frac{U_\pi}{2}$, $\frac{3U_\pi}{2}$ или $-\frac{U_\pi}{2}$, можно перевести работу модулятора в точки 2, 3 или 4 (линейный участок, область квадратуры [7]).

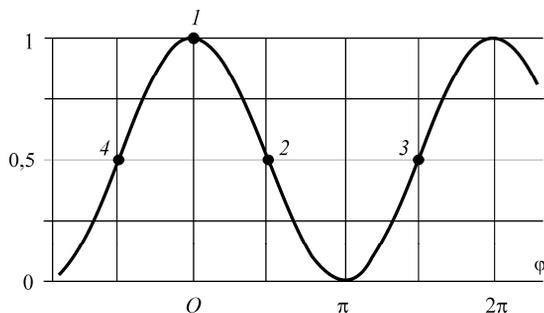


Рис. 3. Зависимость мощности излучения $I_{\text{вых}} = 0,5I_0(1 + \cos \varphi)$ на выходе идеального, симметричного модулятора (интерферометра) от разности фаз φ

Экспериментальная зависимость выходной мощности оптического излучения модулятора от величины приложенного напряжения (разности фаз φ интерферирующих лазерных пучков) приведена в работе [8].

Смещение рабочей точки возможно за счет создания несимметричной (с разной физической длиной плеч) топологией волноводов [7, 8] в процессе изготовления модулятора. При таком способе смещения в датчиках на основе волоконных интерферометров и модуляторах ВОЛС (волоконно-оптических линий связи) не требуется отдельный источник питания, повышается стабильность положения рабочей точки модулятора.

Компания Photline Technologies [9] производит IMZI – интегрально-оптический интерферометр с разностью длины оптического пути до 1000 мкм.

На рис. 2 без напряжения смещения рабочей точки ($U_o = 0$) напряжение фотоприемника с линейной характеристикой равно

$$U_{\text{ФП}} = U_m (1 + \cos \varphi). \quad (2)$$

Величина U_m определяется значением мощности излучения лазера, потерями излучения в модуляторе и характеристиками фотоприемника. При линейной характеристике фотоприемника сигнал без постоянной составляющей равен

$$U_{\text{ФП}} = U_m \cos \varphi. \quad (3)$$

3. Модуляция напряжением $U_1 = U_M \sin \omega t$ без смещения рабочей точки

Введем модуляцию разности хода интерферирующего излучения путем подачи на один электрооптический элемент (рис. 4) модулирующего напряжения $U_1 = U_M \sin \omega t$. На второй электрооптический элемент подадим информационный сигнал $U_{\text{И}}$. Возможна подача U_1 и $U_{\text{И}}$ на оба электрооптических элемента (см. рис. 2). Рассмотрим случай аналогового медленно меняющегося информационного сигнала $U_{\text{И}}$. Это приведет к появлению на выходе фотоприемника модулированного сигнала

$$U_{\text{ФП}} = U_m \cos(\varphi + \Delta\varphi_1 \sin \omega t). \quad (3.1)$$

Начальные фазы приняты равными нулю. Величина φ соответствует информационному сигналу. При аналоговом информационном сигнале $\varphi = \frac{\pi U_{\text{И}}}{U_{\pi}}$, где $U_{\text{И}}$ – напряжение аналогового сигнала, U_{π} – полуволновое напряжение, при котором $\varphi = \pi$, определяется свойствами электрооптического элемента модулятора. При цифровом сигнале (бинарном) φ может принимать следующие значения, например: $\varphi = 0^\circ$ для «0» и $\varphi = 180^\circ$ для «1». Для радиотехнического сигнала (однонального) $\varphi = \varphi_{\text{И}} \sin 2\pi f t$. Величина $\Delta\varphi_1$ равна максимальному изменению разности фазы модулированного интерферирующего излучения $\Delta\varphi_1 = \frac{\pi U_{\text{М}}}{U_{\pi}}$, где $U_{\text{М}}$ – амплитуда модулирующего напряжения. В радиотехнике $\Delta\varphi_1$ – амплитуда изменения фазы – называется девиацией фазы.

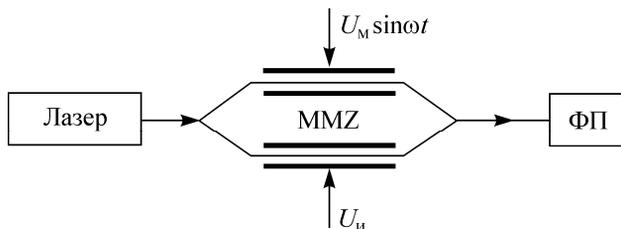


Рис. 4. Электрооптический модулятор без смещения рабочей точки

Тригонометрическая формула сложения аргументов

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta$$

позволяет выражение (3.1) привести к виду

$$U_{\text{ФП}} = U_m \cos \varphi \cos(\Delta\varphi_1 \sin \omega t) - U_m \sin \varphi \sin(\Delta\varphi_1 \sin \omega t). \quad (3.2)$$

Амплитуды колебаний $U_m \cos \varphi$ и $U_m \sin \varphi$ отличаются по фазе между собой на $\pi/2$.

Используем математические выражения [7, с. 33]

$$\cos[\beta \sin(\omega t + \varphi)] = J_0(\beta) + 2J_2(\beta) \cos 2(\omega t + \varphi) +$$

$$\begin{aligned}
 &+ 2J_4(\beta) \cos 4(\omega t + \varphi) + 2J_6 \cos 6(\omega t + \varphi) + \dots; \\
 &\sin[\beta \sin(\omega t + \varphi)] = \\
 &= 2J_1(\beta) \sin(\omega t + \varphi) + 2J_3(\beta) \sin 3(\omega t + \varphi) + 2J_5 \sin 5(\omega t + \varphi) + \dots \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

Разложение (3.2) в ряд Фурье (в формуле (3.3) $\beta = \Delta\varphi_1$, $\varphi = 0$) примет вид

$$\begin{aligned}
 U_{\text{ФП}} = &U_m J_0(\Delta\varphi_1) \cos \varphi - 2U_m J_1(\Delta\varphi_1) \sin \varphi \sin \omega t + \\
 &+ 2U_m J_2(\Delta\varphi_1) \cos \varphi \cos 2\omega t - 2U_m J_3(\Delta\varphi_1) \sin \varphi \sin 3\omega t + \\
 &+ 2U_m J_4(\Delta\varphi_1) \cos \varphi \cos 4\omega t - \dots, \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

где коэффициенты $J_0(\Delta\varphi_1)$, $J_1(\Delta\varphi_1)$, $J_2(\Delta\varphi_1)$, $J_3(\Delta\varphi_1)$, $J_4(\Delta\varphi_1)$, ..., $J_n(\Delta\varphi_n)$ – функции Бесселя первого рода порядков 0, 1, 2, 3, 4, ..., n с $\Delta\varphi_1$ в качестве аргумента (рис. 5).

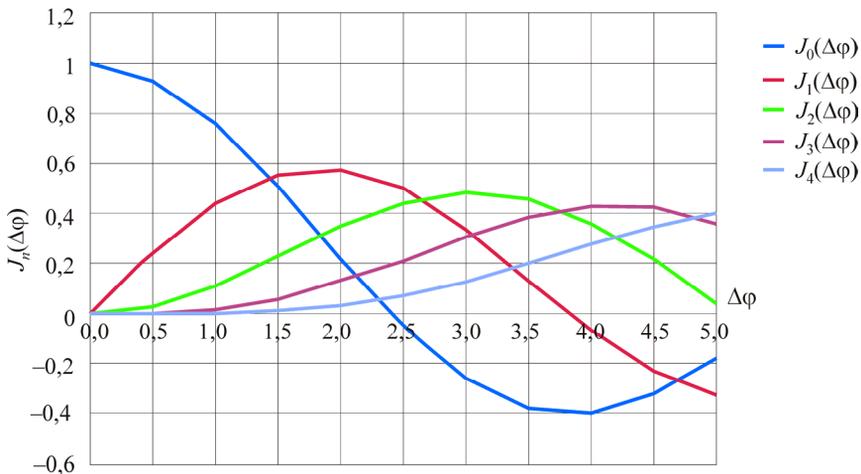


Рис. 5. Графики функций Бесселя первого рода 0, 1, 2, 3 и 4-го порядков: максимальное значение $J_1(\Delta\varphi)$ при $\Delta\varphi = 1,84$, максимальное значение $J_2(\Delta\varphi)$ при $\Delta\varphi = 3,05$

Функция $\cos(\Delta\varphi_1 \sin \omega t)$ – четная, содержит косинусоидальные гармоники четного порядка. Функция $\sin(\Delta\varphi_1 \sin \omega t)$ – нечетная, содержит синусоидальные гармоники нечетного порядка.

Модулятор с низким полуволновым напряжением MZDD-LN-10 Performance Highlights имеет полуволновое напряжение $V\pi$ RF @50kHz 2,5V и диапазон напряжений модуляции (modulation voltage range) от -20 до +20 В [3, табл. Absolute Maximum Ratings для MZDD-LN-10].

Максимально допустимое значение $\Delta\varphi$ равно $\Delta\varphi = \frac{\pi U_{\text{доп}}}{U_{\pi}} = \frac{\pi 20}{2,5} = 8\pi$.

На рис. 5 представлен вполне рабочий диапазон $\Delta\varphi$ электрооптических модуляторов Маха–Цендера.

Используя формулы произведения тригонометрических функций

$$2 \cos \alpha \cos \beta = \cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta),$$

$$2 \sin \alpha \sin \beta = \cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta),$$

преобразуем выражение (3.4) к виду

$$\begin{aligned} U_{\text{ФП}} = & U_m J_0(\Delta\varphi_1) \cos \varphi + U_m J_1(\Delta\varphi_1) [-\cos(\omega t - \varphi) + \cos(\omega t + \varphi)] + \\ & + U_m J_2(\Delta\varphi_1) [\cos(2\omega t - \varphi) + \cos(2\omega t + \varphi)] + \\ & + U_m J_3(\Delta\varphi_1) [-\cos(3\omega t - \varphi) + \cos(3\omega t + \varphi)] + \\ & + U_m J_4(\Delta\varphi_1) [\cos(4\omega t - \varphi) + \cos(4\omega t + \varphi)] + \dots \end{aligned} \quad (3.5)$$

Спектр сигнала фотоприемника $U_{\text{ФП}}$ с учетом знака составляющих представлен на рис. 6. Составляющие одной частоты разнесены условно.

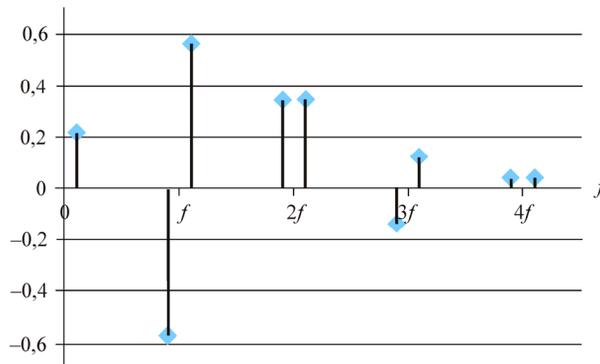


Рис. 6. Спектр сигнала фотоприемника $U_{\text{ФП}}$ при $U_m = 1, \Delta\varphi_1 = \frac{\pi U_M}{U_{\pi}} = 2;$
 $J_0(2) = 0,2239, J_1(2) = 0,5767, J_2(2) = 0,3528, J_3(2) = 0,1289, J_4(2) = 0,0340$

Спектральные составляющие на четных частотах соответствуют спектру балансной амплитудной модуляции с подавлением несущей (double side band, DSB). Составляющие нечетных гармоник имеют разные знаки.

4. Модуляция напряжением $U_1 = U_M \sin \omega t$ со смещением рабочей точки

Проведем анализ спектра сигнала при работе MMZ в рабочей точке 2 (см. рис. 3). На одну группу электродов подадим информационный сигнал $U_{\text{и}}$ и модулирующее напряжение $U_1 = U_M \sin \omega t$ (рис. 7). На вторую группу электродов – напряжение смещения U_o . Величиной напряжения смещения U_o можно установить рабочую точку 2, 3 или 4 (см. рис. 3). Отличие точек 2 и 3 – изменение фазы сигнала фотоприемника на 180° , что не дает дополнительных трудностей.

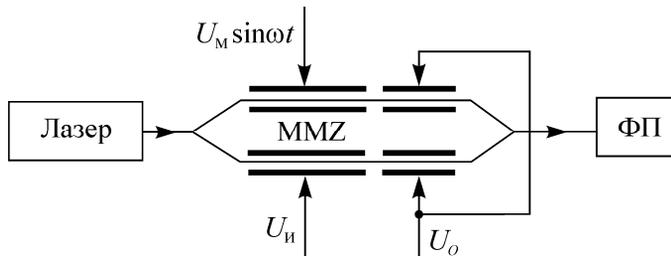


Рис. 7. Электрооптический модулятор со смещением рабочей точки

Подача на управляющие электроды напряжения смещения U_o , информационного сигнала $U_{\text{и}}$ и модулирующего напряжения $U_1 = U_M \sin \omega t$ приводит к появлению на выходе фотоприемника модулированного сигнала:

$$U_{\text{ФП}} = U_m \cos(\varphi_0 + \varphi + \Delta\varphi_1 \sin \omega t). \quad (4.1)$$

Тригонометрические формулы сложения аргументов позволяют выражение (4.1) привести к виду

$$U_{\text{ФП}} = U_m \cos(\varphi_0 + \varphi) \cos(\Delta\varphi_1 \sin \omega t) - U_m \sin(\varphi_0 + \varphi) \sin(\Delta\varphi_1 \sin \omega t) =$$

$$= U_m (\cos \varphi_0 \cos \varphi - \sin \varphi_0 \sin \varphi) \cos (\Delta \varphi_1 \sin \omega t) - \\ - U_m (\sin \varphi_0 \cos \varphi + \cos \varphi_0 \sin \varphi) \sin (\Delta \varphi_1 \sin \omega t).$$

В рабочей точке 2 (см. рис. 3), для которой $U_O = \frac{U_\pi}{2}$, $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$, $\cos \varphi_0 = 0$ и $\sin \varphi_0 = 1$ выражение примет вид

$$U_{\text{ФПН}} = -U_m \sin \varphi \cos (\Delta \varphi_1 \sin \omega t) - U_m \cos \varphi \sin (\Delta \varphi_1 \sin \omega t). \quad (4.2)$$

Используя соотношения (3.3) и формулы произведения тригонометрических функций, получим:

$$U_{\text{ФПН}} = -U_m J_0 (\Delta \varphi_1) \sin \varphi + U_m J_1 (\Delta \varphi_1) [-\sin (\omega t - \varphi) + \sin (\omega t + \varphi)] + \\ + U_m J_2 (\Delta \varphi_1) [\sin (2\omega t - \varphi) - \sin (2\omega t + \varphi)] + \\ + U_m J_3 (\Delta \varphi_1) [-\sin (3\omega t - \varphi) - \sin (3\omega t + \varphi)] + \\ + U_m J_4 (\Delta \varphi_1) [\sin (4\omega t - \varphi) - \sin (4\omega t + \varphi)] + \dots \quad (4.3)$$

Спектр сигнала фотоприемника $U_{\text{ФПН}}$ с учетом знака спектральных составляющих представлен на рис. 8. Составляющие одной частоты разнесены условно.

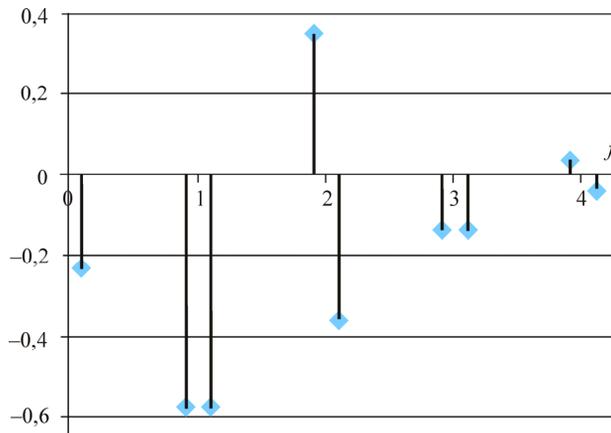


Рис. 8. Спектр сигнала фотоприемника [см. формулу (4.3)] при $U_m = 1$, $\Delta \varphi_1 = \frac{\pi U_M}{U_\pi} = 2$, $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$, $J_0(2) = 0,2239$, $J_1(2) = 0,5767$, $J_2(2) = 0,3528$, $J_3(2) = 0,1289$, $J_4(2) = 0,0340$

Спектральные составляющие на нечетных частотах соответствуют спектру балансной амплитудной модуляции с подавлением несущей. Составляющие четных гармоник имеют разные знаки.

При выборе рабочей точки 3 (см. рис. 3), для которой $U_o = \frac{3U_\pi}{2}$, $\varphi_0 = \frac{3\pi}{2}$, $\cos \varphi_0 = 0$ и $\sin \varphi_0 = -1$ (или рабочей точки 4, для которой $U_o = -\frac{U_\pi}{2}$, $\varphi_0 = -\frac{\pi}{2}$, $\cos \varphi_0 = 0$ и $\sin \varphi_0 = -1$), выражение (4.2) примет вид

$$U_{\text{ФПН}} = U_m \sin \varphi \cos(\Delta\varphi_1 \sin \omega t) + U_m \cos \varphi \sin(\Delta\varphi_1 \sin \omega t). \quad (4.4)$$

Разложив в ряд Фурье, получим:

$$\begin{aligned} U_{\text{ФПН}} = & U_m J_0(\Delta\varphi_1) \sin \varphi + U_m J_1(\Delta\varphi_1) [\sin(\omega t - \varphi) + \sin(\omega t + \varphi)] + \\ & + U_m J_2(\Delta\varphi_1) [-\sin(2\omega t - \varphi) + \sin(2\omega t + \varphi)] + \\ & + U_m J_3(\Delta\varphi_1) [\sin(3\omega t - \varphi) + \sin(3\omega t + \varphi)] + \\ & + U_m J_4(\Delta\varphi_1) [-\sin(4\omega t - \varphi) + \sin(4\omega t + \varphi)] + \dots \end{aligned} \quad (4.5)$$

Из сравнения выражений (4.3) и (4.5) следует, что спектр сигнала аналогичен рис. 8. Изменение знака напряжения смещения с $U_o = \frac{U_\pi}{2}$ на $U_o = -\frac{U_\pi}{2}$ (или подача $U_o = \frac{3U_\pi}{2}$) приводит только к изменению знаков составляющих.

5. Подавление составляющих на частоте 2ω

Амплитуда сигнала на частоте ω максимальна при $\Delta\varphi = 1,84$, $J_1(1,84) = 0,582$. Однако при этом существенное значение имеют составляющие на частоте 2ω (см. рис. 5, 6). Они приводят к искажениям сигнала с амплитудной модуляцией. Для борьбы с ними вводят дополнительный модулятор с модуляцией напряжением, сдвинутым по фазе на 90° (рис. 9). Такую конфигурацию имеет двойной параллельный модулятор МХІQ-LN-40, который состоит из двух подключенных параллельно модуляторов Маха-Цендера [3].

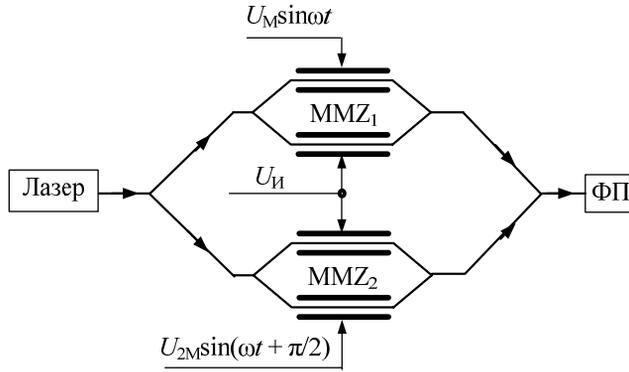


Рис. 9. Модуляция лазерного излучения в схеме с двумя MMZ напряжениями $U_1 = U_M \sin \omega t$ и $U_2 = U_{2M} \sin(\omega t + 90^\circ)$

При подаче на модулятор MMZ₂ модулирующего напряжения

$$U_2 = U_{2m} \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (5.1)$$

на выходе фотоприемника появится модулированный сигнал

$$U_{\text{ФП2}} = U_{2m} \cos(\varphi + \Delta\varphi_2 \sin(\omega t + 90^\circ)). \quad (5.2)$$

Выражение (5.2) приведем к виду

$$\begin{aligned} U_{\text{ФП2}} = & U_{2m} J_0(\Delta\varphi_2) \cos \varphi + \\ & + U_{2m} J_1(\Delta\varphi_2) [-\cos(\omega t + 90^\circ - \varphi) + \cos(\omega t + 90^\circ + \varphi)] + \\ & + U_{2m} J_2(\Delta\varphi_2) [-\cos(2\omega t - \varphi) - \cos(2\omega t + \varphi)] + \\ & + U_{2m} J_3(\Delta\varphi_2) [-\cos(3\omega t + 270^\circ - \varphi) + \cos(3\omega t + 270^\circ + \varphi)] + \\ & + U_{2m} J_4(\Delta\varphi_2) [\cos(4\omega t - \varphi) + \cos(4\omega t + \varphi)] + \dots \end{aligned} \quad (5.3)$$

Спектральные составляющие на частоте 2ω находятся в противофазе относительно составляющих на частоте ω [см. формулу (3.5)] при модуляции сигналом $U_1 = U_M \sin \omega t$ (см. рис. 6, 10). Это свойство используется для подавления в сигнале фотоприемника составляющих на частоте 2ω .

При подаче на модулятор MMZ₁ (см. рис. 9) напряжения $U_1 = U_M \sin \omega t$, а на второй MMZ₂ модулирующего напряжения, сдви-

нутого по фазе на 90° , $U_2 = U_{2M} \sin(\omega t + 90^\circ)$ на выходе фотоприемника сигнал $U_{\text{ФП5}}$ будет равен сумме $U_{\text{ФП1}}$ [см. формулу (3.5)] и $U_{\text{ФП2}}$ [см. формулу (5.3)].

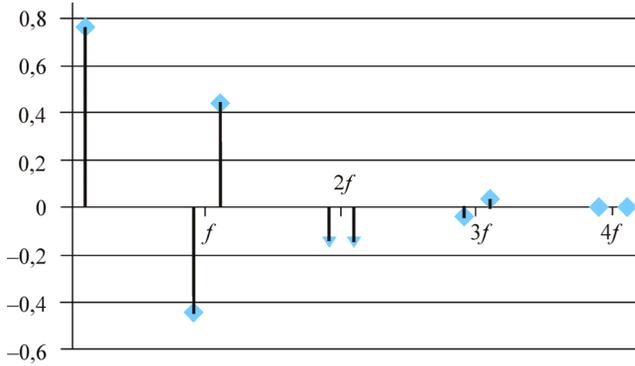


Рис. 10. Спектр сигнала фотоприемника при модулирующем напряжении $U_2 = U_{2M} \sin(\omega t + 90^\circ)$ и $\varphi_2 = 1,0$

При равенстве $U_M = U_{2M}$ и, соответственно, $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi$ и $J_2(\Delta\varphi_1) = J_2(\Delta\varphi_2)$ получим:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{ФП5}} = & 2U_m J_0(\Delta\varphi) \cos \varphi + U_m J_1(\Delta\varphi) [-\cos(\omega t - \varphi) - \cos(\omega t + 90^\circ - \varphi)] + \\
 & + U_m J_1(\Delta\varphi) [\cos(\omega t + \varphi) + \cos(\omega t + 90^\circ + \varphi)] + \\
 & + U_m J_3(\Delta\varphi) [-\cos(3\omega t - \varphi) - \cos(3\omega t + 270^\circ - \varphi)] + \\
 & + U_m J_3(\Delta\varphi) [\cos(3\omega t + \varphi) + \cos(3\omega t + 270^\circ + \varphi)] + \\
 & + 2U_m J_4(\Delta\varphi) [\cos(4\omega t - \varphi) + \cos(4\omega t + \varphi)] + \dots \quad (5.4)
 \end{aligned}$$

Дальнейшие преобразования с использованием формулы суммы тригонометрических функций дают

$$\begin{aligned}
 U_{\text{ФП5}} = & 2U_m J_0(\Delta\varphi) \cos \varphi + \\
 & + 1,41U_m J_1(\Delta\varphi) [-\cos(\omega t + 45^\circ - \varphi) + \cos(\omega t + 45^\circ + \varphi)] + \\
 & + 1,41U_m J_3(\Delta\varphi) [-\cos(3\omega t + 135^\circ - \varphi) + \cos(3\omega t + 135^\circ + \varphi)] +
 \end{aligned}$$

$$+ 2U_m J_4(\Delta\varphi) [\cos(4\omega t - \varphi) + \cos(4\omega t + \varphi)] + \dots \quad (5.5)$$

Составляющие сигнала фотоприемника $U_{\text{ФП5}}$ [см. формулу (5.5)] представлены на рис. 11.

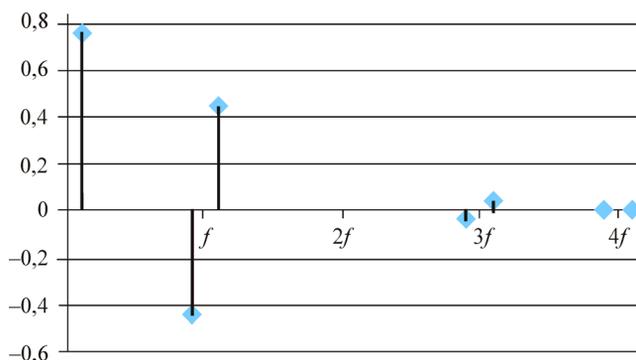


Рис. 11. Составляющие сигнала фотоприемника $U_{\text{ФП5}}$ при модулирующих напряжениях $U_1 = U_M \sin \omega t$ и $U_2 = U_{2M} \sin(\omega t + 90^\circ)$, $U_M = U_{2M}$, $\Delta\varphi = 1.0$

В выражении (5.5) учтем деление излучения лазера в Y -разветвителе для MMZ_1 и MMZ_2 (см. рис. 9) и выделим составляющие на частоте ω :

$$U_{\text{ФП5}\omega} = 0,7U_m J_1(\Delta\varphi) [-\cos(\omega t + 45^\circ - \varphi) + \cos(\omega t + 45^\circ + \varphi)]. \quad (5.6)$$

Получим следующие результаты:

1. Составляющие на частоте 2ω взаимно подавляются при $U_M = U_{2M}$ и сдвиге по фазе модулирующих сигналов на $\pi/2$.
2. Подавление составляющих на частоте 2ω происходит на оптическом уровне в Y -соединителе лазерного излучения от MMZ_1 и MMZ_2 .
3. Составляющие на частоте ω представляют модуляцию без несущей частоты, приобретают дополнительный сдвиг по фазе 45° .
4. Составляющие на частотах 3ω , 4ω и т.д. также изменяются [см. формулу (5.5)], но ввиду их малости не рассматриваются ($J_3(1) = 0,019$, $J_4(1) = 0,002$).

6. Электрооптический квадратурный модулятор

Однополосная модуляция может быть реализована в интегрально-оптических устройствах. На рис. 12 приведен вариант электрооптического квадратурного модулятора. Он состоит из двух параллельно подключенных электрооптических модуляторов Маха–Цендера.

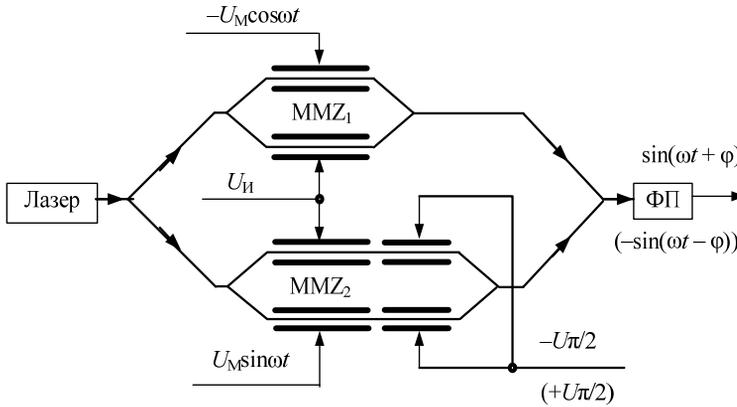


Рис. 12. Схема электрооптического квадратурного модулятора

На первый MMZ_1 подадим модулирующее напряжение $-U_M \cos \omega t$ и информационный сигнал $U_{И}$. Сигнал на выходе фотоприемника от MMZ_1 будет равен

$$U_{\text{ФП1}} = 0,5U_m \cos(\varphi - \Delta\varphi_1 \cos \omega t). \quad (6.1)$$

На второй электрооптический модулятор MMZ_2 подадим модулирующее напряжение $U_m \sin \omega t$, информационный сигнал $U_{И}$ и напряжение смещения рабочей точки $U_o = -\frac{U_\pi}{2}$ (см. рабочую точку 4 на рис. 3). Сигнал на выходе фотоприемника от MMZ_2 будет иметь вид

$$U_{\text{ФП2}} = 0,5U_m \cos(\varphi - 90^\circ + \Delta\varphi_2 \sin \omega t), \quad (6.2)$$

где $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi = \frac{\pi U_M}{U_\pi}$; $\varphi = \frac{\pi U_{И}}{U_\pi}$; $U_{И}$ – напряжение информационного аналогового сигнала; U_π – полуволновое напряжение.

Коэффициент 0,5 учитывает деление излучения лазера на равные части в первом Y -образном разветвителе. Величина U_M учитывает свойства фотоприемника и потери излучения в модуляторе.

В результате преобразований (6.1) и (6.2) получим составляющие на частоте модуляции ω :

$$U_{\Phi\Pi 1} = 0,5U_m J_1(\Delta\varphi_1) [-\sin(\omega t - \varphi) + \sin(\omega t + \varphi)], \quad (6.3)$$

$$U_{\Phi\Pi 2} = 0,5U_m J_1(\Delta\varphi_2) [\sin(\omega t - \varphi) + \sin(\omega t + \varphi)]. \quad (6.4)$$

Суммирование этих составляющих происходит на оптическом уровне в Y -соединителе излучения от MMZ_1 и MMZ_2 . На фотоприемнике при равенстве $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi$ получим:

$$U_{\Phi\Pi} = U_{\Phi\Pi 1} + U_{\Phi\Pi 2} = U_m J_1(\Delta\varphi) \sin(\omega t + \varphi). \quad (6.5)$$

Сигнал на частоте ω имеет одну верхнюю боковую составляющую и представляет собой сигнал, модулированный по фазе информационным напряжением $\varphi = \frac{\pi U_{\text{и}}}{U_{\pi}}$. Информация заложена в разности фаз опорного (модулирующего) напряжения и сигнала с фотоприемника на частоте ω .

При смене знака напряжения смещения рабочей точки MMZ_2 с $U_o = -\frac{U_{\pi}}{2}$ на $U_o = \frac{U_{\pi}}{2}$ (см. рабочую точку 2 на рис. 3) выражение (6.2) примет вид

$$U_{\Phi\Pi 2} = 0,5U_m \cos(\varphi + 90^\circ + \Delta\varphi_2 \sin \omega t). \quad (6.6)$$

После преобразований на частоте ω получим напряжение

$$U_{\Phi\Pi 2} = 0,5U_m J_1(\Delta\varphi_2) [-\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\omega t + \varphi)]. \quad (6.7)$$

В результате суммирования сигналов $U_{\Phi\Pi 1}$ [см. формулу (6.3)] и $U_{\Phi\Pi 2}$ [см. формулу (6.7)] получим на выходе фотоприемника нижнюю боковую составляющую:

$$U_{\Phi\Pi} = U_{\Phi\Pi 1} + U_{\Phi\Pi 2} = -U_m J_1(\Delta\varphi) \sin(\omega t - \varphi). \quad (6.8)$$

Получим следующие результаты:

1. Напряжение на частоте ω представляет собой сигнал, модулированный по фазе информационным напряжением $\varphi = \frac{\pi U_{\text{и}}}{U_{\pi}}$. Информация заложена в разности фаз опорного напряжения и сигнала с фотоприемника.

2. Смена знака напряжения смещения рабочей точки на MMZ_2 позволяет выбрать одну из двух боковых составляющих – $\sin(\omega t + \varphi)$ или $\sin(\omega t - \varphi)$.

3. В цифровых системах электрооптический квадратурный модулятор используется для получения сигналов в формате QPSK (Quadrature Phase Shift Keying – формат модуляции, символы в котором могут иметь четыре различных значения фазы). Символ QPSK сигнала может принимать одно из четырех значений фазы: $0, \pi/2, \pi, 3\pi/4$ [4, 5]. Каждый символ QPSK сигнала передает 2 бита информации.

7. Передача опорного напряжения

На приемной стороне канала связи для фазового детектирования, имеющего преимущества по помехозащищенности, необходимо опорное напряжение.

Подадим на электрооптические элементы второго MMZ_2 модулирующее напряжение $U_7 = U_{7\text{М}} \sin 0,5\omega t$, амплитуда которого $U_{7\text{М}}$ приводит к максимальному изменению фазы при модуляции $\Delta\varphi_7 = \frac{\pi U_{7\text{М}}}{U_{\pi}}$, и постоянное напряжение смещения U_0 , которое приведет к постоянному сдвигу фазы $\varphi_0 = \frac{\pi U_0}{U_{\pi}}$ (рис. 13).

Сигнал от MMZ_2 на выходе фотоприемника будет иметь вид

$$U_{\text{ФП7}} = U_{7\text{м}} \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi_7 \sin 0,5\omega t). \quad (7.1)$$

Начальная фаза принята равной нулю. Выражение (7.1) приведем к виду

$$U_{\text{ФП7}} = U_{7\text{м}} \cos \varphi_0 \cos(\Delta\varphi_7 \sin 0,5\omega t) - U_{7\text{м}} \sin \varphi_0 \sin(\Delta\varphi_7 \sin 0,5\omega t). \quad (7.2)$$

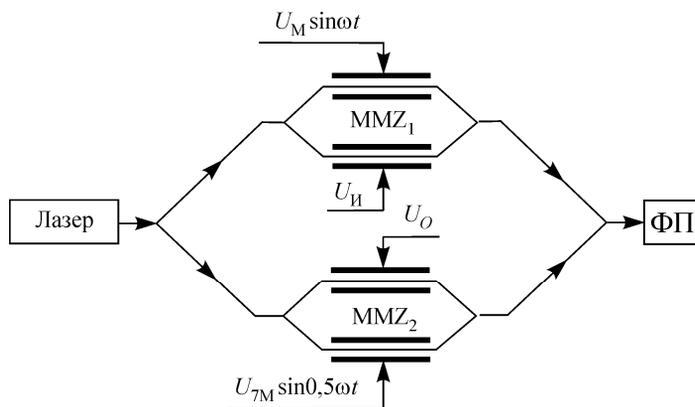


Рис. 13. Передача опорного напряжения

Для рабочей точки 4, для которой $U_O = -\frac{U_\pi}{2}$, $\varphi_0 = -\frac{\pi}{2}$, $\cos \varphi_0 = 0$ и $\sin \varphi_0 = -1$, выражение (7.2), разложенное в ряд Фурье, примет вид

$$\begin{aligned}
 U_{\text{ФП7}} &= U_{7m} \sin(\Delta\varphi_7 \sin 0,5\omega t) = \\
 &= 2U_{7m} J_1(\Delta\varphi_7) \sin 0,5\omega t + 2U_{7m} J_3(\Delta\varphi_7) \sin 1,5\omega t + \\
 &\quad + 2U_{7m} J_5 \sin 2,5\omega t + \dots
 \end{aligned}
 \tag{7.3}$$

Сигнал $U_{\text{ФП7}}$ состоит из нечетных гармоник. Спектр составляющих $U_{\text{ФП7}}$ приведен на рис. 14. При $\Delta\varphi_7 = 1,84$ составляющая на частоте $0,5\omega$ максимальна, а на частоте $1,5\omega$ в 5,6 раз меньше составляющей на частоте $0,5\omega$. Уменьшая $\Delta\varphi_7$ можно уменьшить составляющую $1,5\omega$ относительно первой гармоники.

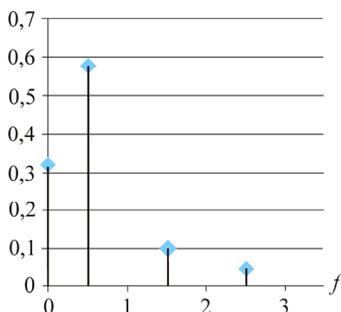


Рис. 14. Спектр сигнала от MMZ_2 [см. формулу (7.3)]

при $\Delta\varphi_7 = 1,84$, $U_O = -\frac{U_\pi}{2}$ и $2U_{7m} = 1$

На приемной стороне сигнал с частотой $0,5\omega$, выделенный избирательным усилителем из напряжения фотоприемника, подается на умножитель частоты. Полученное опорное напряжение с частотой ω можно использовать для фазового детектирования.

8. Квадратурный модулятор без напряжения смещения рабочей точки

В схеме, состоящей из двух параллельно подключенных модуляторов (рис. 15), подадим на MMZ_1 модулирующее напряжение $U_1 = U_{1M} \sin \omega t$, а на MMZ_2 – модулирующее напряжение уменьшенной в два раза частоты $U_2 = U_{2M} \sin 0,5\omega t$.

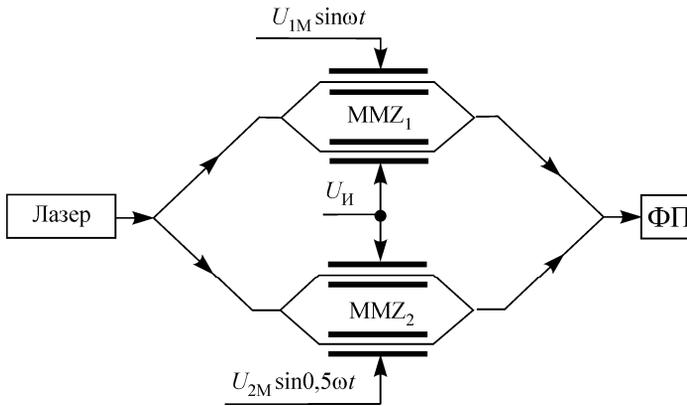


Рис. 15. Схема электрооптического квадратурного модулятора без напряжения смещения рабочей точки

Начальные фазы приняты равными нулю. Мощность лазерного излучения, поступающего на MMZ_1 и MMZ_2 , будем считать одинаковой. Напряжение на выходе фотоприемника будет равно сумме сигналов $U_{\Phi\Pi 1}$ от MMZ_1 и $U_{\Phi\Pi 2}$ от MMZ_2 :

$$U_{\Phi\Pi 1} = U_m \cos(\varphi + \Delta\varphi_1 \sin \omega t) \text{ и } U_{\Phi\Pi 2} = U_m \cos(\varphi + \Delta\varphi_2 \sin 0,5\omega t), \quad (8.1)$$

где $\varphi = \frac{\pi U_{И}}{U_{\pi}}$; $U_{И}$ – напряжение информационного аналогового сигнала; U_{π} – полуволновое напряжение (при котором $\varphi = \pi$, определяется свойствами модулятора).

Примем, что полуволновые напряжения MMZ_1 и MMZ_2 равны. Величина $\Delta\varphi$ равна максимальному изменению разности фазы модулированного интерферирующего излучения: $\Delta\varphi_1 = \frac{\pi U_{1M}}{U_\pi}$, $\Delta\varphi_2 = \frac{\pi U_{2M}}{U_\pi}$, U_{1M} и U_{2M} – амплитуды модулирующего напряжения. Величина U_m определяется мощностью излучения лазера, потерями излучения в модуляторах и параметрами фотоприемника, а также учитывает деление лазерного излучения на MMZ_1 и MMZ_2 .

Сигналы фотоприемника, разложенные в ряд Фурье, имеют вид

$$\begin{aligned}
 U_{\Phi\Pi 1} = & U_m J_0(\Delta\varphi_1) \cos \varphi + U_m J_1(\Delta\varphi_1) [-\cos(\omega t - \varphi) + \cos(\omega t + \varphi)] + \\
 & + U_m J_2(\Delta\varphi_1) [\cos(2\omega t - \varphi) + \cos(2\omega t + \varphi)] + \\
 & + U_m J_3(\Delta\varphi_1) [-\cos(3\omega t - \varphi) + \cos(3\omega t + \varphi)] + \dots \\
 U_{\Phi\Pi 2} = & U_m J_0(\Delta\varphi_2) \cos \varphi + \\
 & + U_m J_1(\Delta\varphi_2) [-\cos(0,5\omega t - \varphi) + \cos(0,5\omega t + \varphi)] + \\
 & + U_m J_2(\Delta\varphi_2) [\cos(\omega t - \varphi) + \cos(\omega t + \varphi)] + \\
 & + U_m J_3(\Delta\varphi_2) [-\cos(1,5\omega t - \varphi) + \cos(1,5\omega t + \varphi)] + \dots
 \end{aligned}$$

При $J_1(\Delta\varphi_1) = J_2(\Delta\varphi_2)$ на частоте ω в сигнале фотоприемника остается одна составляющая:

$$U_{\Phi\Pi\omega} = U_m [J_1(\Delta\varphi_1) + J_2(\Delta\varphi_2)] \cos(\omega t + \varphi). \quad (8.2)$$

Получим следующие результаты:

1. Выделенная с помощью избирательного усилителя из сигнала фотоприемника составляющая с частотой ω представляет собой модулированный по фазе сигнал:

$$U_{\Phi\Pi\omega} = U_m [J_1(\Delta\varphi_1) + J_2(\Delta\varphi_2)] \cos(\omega t + \varphi),$$

где φ соответствует информационному сигналу $\varphi = \frac{\pi U_{\text{и}}}{U_\pi}$.

2. Подавление составляющей $\cos(\omega t - \varphi)$ происходит на оптическом уровне в Y-соединителе лазерного излучения от ММЗ₁ и ММЗ₂.

3. Для получения сигнала с фазовой модуляцией необходимо обеспечить равенство $J_1(\Delta\varphi_1) = J_2(\Delta\varphi_2)$.

4. Максимальным сигнал будет при максимуме $J_2(\Delta\varphi_2) = J_2(3,03) = 0,4865$ и $\Delta\varphi_1 = 1,5554$.

5. По сравнению с рассмотренным в п. 6 оптическим квадратурным модулятором в схеме на рис. 15 не требуется смещение рабочей точки ММЗ₂ и, соответственно, не нужна система компенсации дрейфа рабочей точки. Это повышает стабильность и надежность предложенной схемы квадратурного модулятора.

9. Модуляция фазы сигнала в схеме с одним модулятором Маха–Цендера

Получение сигнала, модулированного по фазе аналогичного (8.2), возможно с одним модулятором Маха–Цендера. На рис. 16 приведен вариант, в котором модулирующее напряжение $U_1 = U_{1M} \sin \omega t$ подается на один электрооптический элемент, а информационное напряжение $U_{И}$ и модулирующее напряжение $U_2 = U_{2M} \sin 2\omega t$ – на второй.

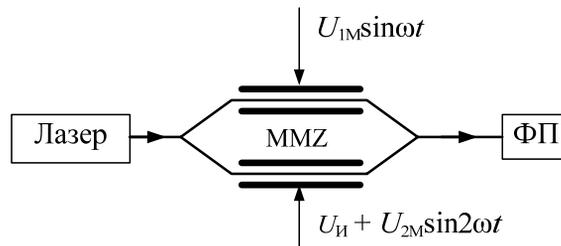


Рис. 16. Модуляция фазы сигнала в схеме с одним модулятором Маха–Цендера

Напряжение на выходе фотоприемника равно

$$U_{\text{ФП}} = U_m \cos(\varphi + \Delta\varphi_1 \sin \omega t + \Delta\varphi_2 \sin 2\omega t). \quad (9.1)$$

В результате разложения в ряд Фурье и выделения составляющих с частотой $2\omega t$ получаем

$$U_{\text{ФП}(2\omega)} = U_m \left[J_2(\Delta\varphi_1) J_0(\Delta\varphi_2) + J_2(\Delta\varphi_1) J_2(\Delta\varphi_2) \right] \times \\ \times \left[\cos(2\omega t - \varphi) + \cos(2\omega t + \varphi) \right] + \\ + U_m J_0(\Delta\varphi_1) J_1(\Delta\varphi_2) \left[-\cos(2\omega t - \varphi) + \cos(2\omega t + \varphi) \right]. \quad (9.2)$$

В полученном выражении (9.2) составляющие с функциями Бесселя порядков 3 и выше не учтены.

Для подавления составляющей $\cos(2\omega t - \varphi)$ необходимо обеспечить равенство

$$J_2(\Delta\varphi_1) J_0(\Delta\varphi_2) + J_2(\Delta\varphi_1) J_2(\Delta\varphi_2) = J_0(\Delta\varphi_1) J_1(\Delta\varphi_2). \quad (9.3)$$

Сигнал фотоприемника будет равен

$$U_{\text{ФП}(2\omega)} = 2U_m J_0(\Delta\varphi_1) J_1(\Delta\varphi_2) \cos(2\omega t + \varphi). \quad (9.4)$$

Более удобное для анализа условие (9.3) имеет вид

$$\frac{J_0(\Delta\varphi_2) + J_2(\Delta\varphi_2)}{J_1(\Delta\varphi_2)} = \frac{J_0(\Delta\varphi_1)}{J_2(\Delta\varphi_1)}. \quad (9.5)$$

Графическое (приближенное) решение соотношения (9.5) сведено в таблицу, в которой приведены значения $\Delta\varphi_2$ и $\Delta\varphi_1$, обеспечивающие равенство (9.3), и величина амплитуды сигнала фотоприемника (9.4) на частоте 2ω при $2U_m = 1$: $J_0(\Delta\varphi_1) J_1(\Delta\varphi_2)$. Максимальная амплитуда составляющей сигнала фотоприемника $\cos(2\omega t + \varphi)$ будет при $\Delta\varphi_2 = 1,2-1,5$ и $\Delta\varphi_1 = 1,6-1,7$.

Результаты графического решения формулы (9.5)

$\Delta\varphi_2$	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
$\Delta\varphi_1$	1,44	1,52	1,6	1,62	1,67	1,7	1,73	1,76
$J_0(\Delta\varphi_1) J_1(\Delta\varphi_2)$	0,200	0,214	0,216	0,219	0,218	0,22	0,212	0,208

Выводы:

1. Модуляция напряжениями с частотами ω и 2ω позволяет получить в схеме с одним модулятором Маха–Цендера сигнал с фазовой

модуляцией $\cos(2\omega t + \varphi)$, где фаза φ определяется информационным напряжением $\varphi = \frac{\pi U_{\text{и}}}{U_{\pi}}$.

2. Схема с одним ММЗ (см. рис. 16) обладает преимуществами. Не требуется перевода рабочей точки в квадратуру и компенсации ее дрейфа. Она проще и должна обладать большей стабильностью и надежностью режима работы модулятора. Потребуется только компенсация разницы оптической длины плеч модулятора.

10. Модуляция фазы сигнала в датчиках, использующих интерферометрические методы на эффекте Саньяка

Модуляция напряжениями с частотами ω и 2ω позволяет получить сигнал с модуляцией фазы сигнала $\cos(2\omega t + \varphi)$ в датчиках, использующих интерференционные методы на эффекте Саньяка.

Волоконно-оптические гироскопы используются с целью измерения и контроля угловой скорости вращения в инерциальном пространстве. В основе работы интерференционного волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) лежит эффект Саньяка, который заключается в возникновении разности времен обхода оптического контура электромагнитными волнами (светом), распространяющимися по контуру в противоположных направлениях [10–12]. В результате возникает разность фаз φ этих волн, которая определяется величиной угловой скорости оптического контура:

$$\varphi = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega, \quad (10)$$

где φ – разность фаз; L – длина световода катушки; D – средний диаметр катушки; λ – длина оптической волны в вакууме; Ω – составляющая угловой скорости, параллельная оси катушки; c – скорость света в вакууме.

Волоконно-оптический гироскоп с электрооптическим модулятором состоит из многофункционального интегрально-оптического элемента (МИОЭ) и волоконного контура (ВК) [12].

МИОЭ выполняет три функции:

1) поляризация проходящего света с целью уменьшения нестабильности смещения нуля вследствие поляризационной невзаимности;

2) расщепление световых волн на распространяющиеся по и против часовой стрелки в ВК с равными мощностями с последующей рекомбинацией на Y-разветвителе;

3) внесение фазового сдвига между встречными волнами с помощью электрооптического фазового модулятора.

В результате интерференции без модуляции на выходе фотоприемника сигнал равен

$$U_{\text{ФП}} = U_m (1 + \cos \varphi).$$

Широкополосные фазовые модуляторы, расположенные на обоих плечах МИОЭ, используются компанией «Оптолинк» [12] для внесения пилообразной фазовой модуляции, обеспечивая работу приборов в режиме замкнутого контура. Используется формирование пилообразной фазовой модуляции света с целью компенсации разности фаз Саньяка.

Компания Photline Technologies (Франция) производит многофункциональную интегрально-оптическую схему для волоконно-оптических гироскопов и интерферометрических датчиков на основе эффекта Саньяка Y-JPX-LN series Polarizing Y-Junction Phase Modulator. Схема имеет следующие параметры: длина волны – 1460–1610 нм; полоса модуляции – 30 МГц; полуволновое напряжение – 7 В; вносимые потери – 6,5 дБ; диапазон рабочих температур – от –40 до +85 °С [9].

Модуляция частотами ω и 2ω позволяет получить информационный сигнал вида [см. формулу (9.4)]

$$U_{\text{ФП}(2\omega)} = 2U_m J_0(\Delta\varphi_1) J_1(\Delta\varphi_2) \cos(2\omega t + \varphi).$$

Информация о скорости вращения гироскопа заложена в сдвиге фазы сигнала φ [см. формулу (10)] относительно опорного напряжения, что обеспечит линейность характеристики датчика.

Выбор частоты модуляции, при которой минимальны шумы, а также фазовая обработка сигнала с фазовым представлением информации, позволит снизить влияние шумов [13] и, следовательно, повысить чувствительность и точность ВОГ.

Заключение

В статье рассмотрены варианты использования электрооптических модуляторов Маха–Цендера. Получены спектры при модуляции аналоговых медленно меняющихся сигналов. Определены оптималь-

ные параметры модуляции. Предложена схема электрооптического квадратного модулятора без напряжения смещения рабочей точки. Обоснована схема электрооптического квадратного модулятора с использованием одного электрооптического модулятора Маха–Цендера за счет модуляции частотами ω и 2ω . Предложено применить новые схемные решения с фазовым сигналом в датчиках, использующих интерференционные методы на эффекте Саньяка.

Список литературы

1. Древо Д.Р., Зюрюкин Ю.А., Ушаков Н.М. Модификации электрооптического модулятора Маха–Цендера для управления лазерным излучением повышенной мощности // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: материалы V конф. молодых ученых. – Саратов, 2010. – С. 18–19.
2. Слепов Н.Н. Оптические волоконные конверторы и модуляторы // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2000. – № 6. – С. 6–10.
3. Волоконно-оптические модуляторы. Амплитудные электрооптические модуляторы Маха–Цендера [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.sphotonics.ru> (дата обращения: 10.06.2016).
4. Величко М.А., Наний О.Е., Сусьян А.А. Новые форматы модуляции в оптических системах связи // Lightwave Russian Edition. – 2005. – № 4. – С. 21–30.
5. Наний О.Е., Трещиков В.Н. Новое поколение DWDM-систем связи // Фотон-экспресс. – 2014. – № 4 (116). – С. 18–23.
6. Пономарев Р.С. Модулятор интенсивности излучения на интерферометре Маха–Цендера [Электронный ресурс]. – URL: fibopt.ru>rfo2011/presentation/A7-3.pdf (дата обращения: 21.06.2016).
7. Интегрально-оптический модулятор на основе интерферометра Маха–Цендера с асимметричной топологией волноводов / Е.Д. Вобликов, А.Б. Волынцев, А.А. Журавлев, А.В. Кичанов, Р.С. Пономарев, Д.И. Шевцов // Труды МАИ. – 2011. – № 46.
8. Пономарев Р.С., Вобликов Е.Д. Некоторые вопросы работы интегрально-оптических модуляторов интенсивности // Вестник Перм. ун-та. Сер.: Физика. – 2011. – Вып. 2 (17). – С. 65–68.
9. Интегральная оптика и модуляторы для специальных применений [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.sphotonics.ru> (дата обращения: 20.06.2016).

10. Листвин В.Н., Логозинский В.Н. Миниатюрные волоконно-оптические датчики вращения: конструкция, технология, характеристики // *Электроника: наука, технология, бизнес.* – 2006. – № 8. – С. 72–77.

11. Волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности / Ю.Н. Коркишко, В.А. Федоров, В.Е. Прилуцкий [и др.] // *Гироскопия и навигация.* – 2008. – № 1. – С. 71–81.

12. Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы с линейным выходом [Электронный ресурс] / В.Е. Прилуцкий, В.Г. Пономарев, В.Г. Марчук, М.А. Фенюк, Ю.Н. Коркишко, В.А. Федоров, С.М. Кострицкий, Е.М. Падерин, А.И. Зуев. – URL: <http://optolink.ru/ru...volokonno-opticheskie-giroskopy-s> (дата обращения: 21.06.2016).

13. Исследование и идентификация структуры шумов высокоточных волоконно-оптических гироскопов [Электронный ресурс] / Ю.Н. Коркишко, В.А. Федоров, В.Е. Прилуцкий, В.Г. Пономарев, И.В. Морев, Д.В. Обухович, И.В. Федоров, Н.И. Кробка // Докл. XX С.-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 27–29 мая 2013. – СПб., 2013. – С. 32–35. – URL: <http://optolink.ru/ftpgetfile.php?id=104> (дата обращения: 21.06.2016).

References

1. Drevko D.R., Ziuriukin Iu.A., Ushakov N.M. Modifikatsii elektroopticheskogo moduliatora Makha–Tsendera dlia upravleniia lazernym izlucheniem povyshennoi moshchnosti [Modification of the electro-optical modulator of the Mach–Zehnder to control the laser radiation of high power]. *Materialy V konferentsii molodykh uchenykh "Nanoelektronika, nanofotonika i nelineinaia fizika"*. Saratov, 2010, pp. 18-19.

2. Slepov N.N. Opticheskie volokonnye konvertory i modulyatory [Optical fiber converters and modulators]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2000, no. 6, pp. 6-10.

3. Volokonno-opticheskie modulyatory. Amplitudnye elektroopticheskie modulyatory Makha–Tsendera [Fiber-optic modulators. The amplitude electro-optical modulators of the Mach–Zehnder], available at: <http://www.sphotonics.ru> (accessed 10 June 2016).

4. Velichko M.A., Nanii O.E., Sus'ian A.A. Novye formaty moduliatsii v opticheskikh sistemakh sviazi [New modulation formats in optical communication systems]. *Lightwave Russian Edition*, 2005, no. 4, pp. 21-30.

5. Nanii O.E., Treshchikov V.N. Novoe pokolenie DWDM-sistem sviazi [New generation of DWDM communication systems]. *Foton-express*, 2014, no. 4 (116), pp. 18-23.

6. Ponomarev R.S. Moduliator intensivnosti izlucheniia na interferometre Makha–Tsendera [Modulator of intensity of radiation on the interferometer of Mach–Zehnder], available at: <http://fibopt.ru>rfo2011/presentation/A7-3.pdf> (accessed 21 June 2016).

7. Voblikov E.D., Volyntsev A.B., Zhuravlev A.A., Kachanov A.V., Ponomarev R.S., Shevtsov D.I. Integral'no-opticheskii moduliator na osnove interferometra Makha-Tsendera s asimmetrichnoi topologiei volnovodov [Integrated optical modulator based on an interferometer of the Mach–Zehnder with asymmetric waveguides topology]. *Trudy Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, no. 46.

8. Ponomarev R.S., Voblikov E.D. Nekotorye voprosy raboty integral'no-opticheskikh modulatorov intensivnosti [Some issues of integrated-optical intensity modulators]. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika*, 2011, no. 2 (17), pp. 65-68.

9. Integral'naia optika i modulatory dlia spetsial'nykh primenenii [Integrated optics and modulators for special applications], available at: <http://www.sphotonics.ru> (accessed 20 June 2016).

10. Listvin V.N., Logozinskii V.N. Miniatiurnye volokonno-opticheskie datchiki vrashcheniia: konstruktsiia, tekhnologiia, kharakteristiki [Miniature fiber-optic rotation sensors: design, technology, characteristics]. *Elektronika: nauka, tekhnologiia, biznes*, 2006, no. 8, pp. 72-77.

11. Korkishko Iu.N., Fedorov V.A., Prilutskii V.E. [et al.]. Volokonno-opticheskii giroskop navigatsionnogo klassa tochnosti [Fiber optic gyro of navigation accuracy class]. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2008, no. 1, pp. 71-81.

12. Prilutskii V.E., Ponomarev V.G., Marchuk V.G., Feniuk M.A., Korkishko Iu.N., Fedorov V.A., Kostritskii S.M., Paderin E.M., Zuev I.A. Interferometricheskie volokonno-opticheskie giroskopy s lineinym vykhodom [Interferometric fiber-optic gyroscopes with linear out-

put], available at: [http://optolink.ru"ru...volokonno-opticheskie-giroskopy-s](http://optolink.ru) (accessed 21 June 2016).

13. Korkishko Iu.N., Fedorov V.A., Prilutskii V.E., Ponomarev V.G., Morev I.V., Obukhovich D.V., Fedorov I.V., Krobka N.I. Issledovanie i identifikatsiia struktury шумов vysokotochnykh volokonno-opticheskikh giroskopov [The study and identification of the noise structure of high-precision fiber-optic gyroscopes]. *Doklady XX Sankt-Peterburgskoi mezhdunarodnoi konferentsii po integrirovannym navigatsionnym sistemam, Sankt Peterburg, 27-29 maia 2013 goda*. Saint Petesburg, 2013, pp. 32-35, available at: [http://optolink.ru"ftpgetfile.php?id=104](http://optolink.ru) (accessed 21 June 2016).

Получено 20.10.2016