

УДК 621.374.4
PACS 42.79.Hr

Умножение частоты в электрооптическом модуляторе Маха–Цендера

В. М. Афанасьев¹, Р. С. Пономарев²

¹ Коломенский институт (филиал) Московского государственного машиностроительного университета 140402, Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 408

email: vamvitali@yandex.ru

² Пермский государственный национальный исследовательский университет

614990, Пермь, ул. Букирева, 15

email: kuperok2003@mail.ru

Проведен анализ параметров работы электрооптического модулятора Маха–Цендера в схемах умножения частоты радиосигнала. Выявлены возможности умножения частоты и установлены оптимальные параметры сигналов. Определено, что при заданной геометрии электродов модулятора для более длинных волн лазерного излучения полуволновое напряжение выше, чем для более коротких длин волн. Максимальный допустимый индекс модуляции больше у электрооптических модуляторов Маха–Цендера с меньшей длиной волны лазерного излучения. Число и амплитуда спектральных составляющих на выходе модулятора зависят не только от амплитуды модулирующего СВЧ-сигнала, но и от местоположения рабочей точки на передаточной функции модулятора. Без смещения рабочей точки электрооптический модулятор Маха–Цендера позволяет умножить частоту сигнала в 2, 4 и 6 раз (получить четные гармоники). Смещение рабочей точки модулятора в линейную область передаточной функции обеспечивает получение нечетных гармоник. Максимальная частота гармоник ограничена допустимой амплитудой модулирующего напряжения. Дальнейшее значительное увеличение коэффициента умножения частоты возможно в схемах с двумя и более модуляторами Маха–Цендера. Схема с двумя модуляторами позволяет сформировать сетку частот. Приведена методика экспериментального определения динамического полуволнового напряжения электрооптического модулятора на частоте модуляции. Модулятор Маха–Цендера в режиме генерации нечетных гармоник может использоваться как преобразователь синусоидального напряжения в периодическое напряжение близкое к импульсному.

Ключевые слова: радиофотонный умножитель частоты; электрооптический модулятор Маха–Цендера; положение рабочей точки; диапазон напряжений модуляции; умножение частоты радиосигнала; спектр сигнала.

Поступила в редакцию 14.10.2019; принята к опубликованию 27.12.2019

The frequency multiplication in electrooptical modulator of the Mach–Zehnder

V. M. Afanas'ev¹, R. S. Ponomarev²

¹ Kolomna Institute (branch) of Moscow State Engineering University (MAMI), October revolution st. 408, 140402, Kolomna

email: vamvitali@yandex.ru

² Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

email: kuperok2003@mail.ru

The analysis of parameters of work of the electrooptical modulator of the Mach–Zehnder circuits for frequency multiplication of the radio signal. The possibilities of frequency multiplication are re-

vealed and the optimal parameters of signals are determined. It is determined that for a given geometry of the modulator electrodes for longer laser waves, the half-wave voltage is higher than for shorter wavelengths. The maximum permissible modulation index is higher in Mach-Zehnder electrooptical modulators with a shorter wavelength of laser radiation. The number and amplitude of the spectral components at the output of the modulator depends on the amplitude of the modulating microwave signal, as well as on the location of the working point on the transfer function of the modulator. Without shifting the operating point, the Mach-Zehnder electrooptical modulator multiplies the signal frequency by 2, 4 and 6 times (to obtain even harmonics). If the modulator allows for a larger modulation index, even harmonics of a larger order can be obtained. The shift of the working point of the Mach-Zehnder modulator to the linear region of the transfer function (by half the half-wave voltage) allows to obtain odd harmonics. When the displacement voltage of the working point is equal to a quarter of the half-wave voltage, the Mach-Zehnder electrooptical modulator allows to obtain both even and odd harmonics. The maximum frequency of harmonics is limited by the allowable voltage amplitude for RF electrodes (the permissible amplitude of the modulating voltage). A further significant increase in the frequency multiplication factor is possible in circuits with two or more Mach-Zehnder modulators. Diagram with two modulators of the Mach-Zehnder allows you to get a grid of frequencies. The Mach-Zehnder modulator in the mode of odd harmonic generation can be used as a converter of sinusoidal voltage to a periodic voltage close to the pulse voltage. Radio-photon frequency multipliers have a wide band of operating frequencies. It is determined by the frequency properties of the modulator and photodetector. Frequency multipliers signal current in radiophonic systems to transfer sinusoidal frequencies in the microwave range, to synthesize a grid of frequencies.

Keywords: radiophotonic frequency multiplier; electrooptic modulators Mach-Zehnder; operating point value; modulation voltage range; the frequency multiplication of the radio signal; signal spectrum.

Received 14.10.2019; accepted 27.12.2019

doi: 10.17072/1994-3598-2020-1-26-34

1. Введение

Фотонные устройства способны расширить возможности радиочастотных систем [1,2]. Фотон – частица, которая не имеет заряда и массы покоя. Это позволяет преодолеть физические ограничения электроники. Одна из функций фотонных подсистем – повышение частоты радиосигнала. Умножение частоты применяется для переноса кварцованных частот в СВЧ-диапазон, синтеза сетки частот.

В радиотехнических системах генерация четных гармоник (2ω , 4ω , 8ω , ...) производится в средах с квадратичной нелинейностью, а для генерации нечетных гармоник (3ω , 9ω , ...) используются среды с кубической нелинейностью.

Использование электрооптического модулятора Маха-Цендера (ЭОМ, MMZ) позволяет повышать частоту радиосигнала в широком диапазоне частот, получать четные и нечетные гармоники.

Целью данной работы является проведение анализа преобразований сигналов в интерференционном модуляторе Маха-Цендера, выявление новых возможностей и определение оптимальных параметров модулирующих сигналов в радиофотонных умножителях частоты.

2. Выбор модулятора

Типичный электрооптический модулятор Маха-Цендера, представлен на рис. 1 [3].

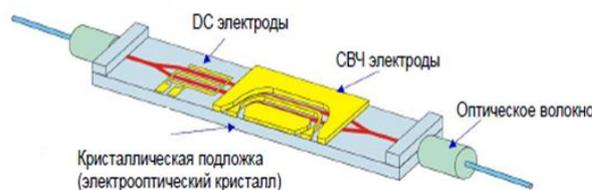


Рис. 1. Интегрально-оптический СВЧ модулятор Маха-Цендера [3]: DC – электроды смещения; СВЧ (RF) электроды в виде копланарной линии бегущей волны

Непрерывное лазерное излучение входного световода направляется по двум каналам, которые соединяются в выходном световоде, при этом составляющие складываются когерентно. Эти два пути образуют два плеча интерферометра. Около световодов напыляют СВЧ (RF) – электроды модуляции и DC (bias) – электроды смещения рабочей точки. При подаче на электроды напряжения происходит изменение показателя преломления в световодах, вызванное действием линейного электрооптического эффекта (эффекта Поккельса). Лазерное излучение в плечах распространяется с разными скоростями и приобретает разность фаз φ .

Схема модулятора с типичной конфигурацией приведена на рис. 2.

На DC-электроды подают напряжение смещения рабочей точки U_c , а на RF (СВЧ)-электроды – высокочастотное модулирующее напряжение.

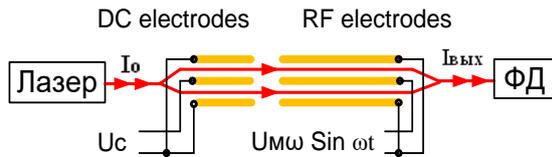


Рис. 2. Схема типичного электрооптического модулятора Маха-Цендера в интегральном исполнении. DC electrodes – электроды смещения рабочей точки, RF electrodes – СВЧ электроды модуляции

Выпускаются электрооптические модуляторы и с совмещенными системами электродов. Например, модуляторы для аналоговой и цифровой модуляции серии AM компании JENOPTIK (Германия) имеют совмещенные RF и DC электроды [4]. Одна из схем подключения модулятора приведена на рис. 3.

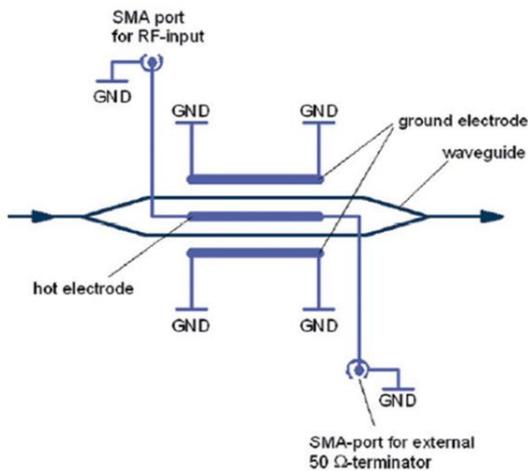


Рис. 3. Схема цепей модуляторов с совмещенными электродами серии AM компании JENOPTIK [4]

Компания VIAVI Solutions выпускает Dual Drive Mach-Zehnder (DDMZ) модулятор с совмещенными RF и DC электродами [5]. При этом имеется возможность раздельной подачи разных модулирующих сигналов на разные плечи интерферометра модулятора (рис. 4).

Наиболее важными электрическими характеристиками электродов являются статическое полуволновое напряжение $V_{\pi DC}$ и динамическое полуволновое напряжение $V_{\pi RF}$.

Статическое полуволновое напряжение электрооптического модулятора (Static half-wave voltage) характеризует напряжение, используемое для задания положения рабочей точки. Это – минимальное статическое напряжение, подаваемое на электрооптический модулятор, необходимое для изменения его коэффициента пропускания от минимального до максимального, или, наоборот, изменения фазовой задержки на π радиан [6].

Динамическое полуволновое напряжение электрооптического модулятора (Dynamic half-wave

voltage) характеризует модулирующее напряжение. Это – минимальное амплитудное напряжение на частоте модуляции, подаваемое на электрооптический модулятор, необходимое для изменения его коэффициента пропускания от минимального до максимального, или, наоборот, изменения фазовой задержки на π радиан [6].

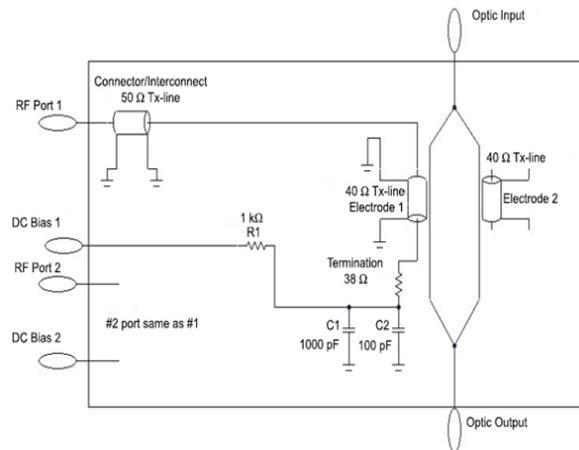


Рис. 4. Схема электрических цепей модулятора DDMZ компании VIAVI Solutions [5]

Модулирующие электроды должны быть более длинными для обеспечения эффективного распределенного (на длине L) взаимодействия полей электрической и оптической волн. Показатель преломления изменяется в области между электродами, и свет приобретает фазовый сдвиг. Сдвиг фазы $\Delta\varphi$ является линейным по отношению к приложенному напряжению U и с хорошим приближением описывается [4]:

$$\Delta\varphi = -\frac{\pi L}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{U}{g} \Gamma,$$

где r_{33} – электрооптический коэффициент (равен 33 пм/В), Γ – эффективность распределенного поля в модуляторах ниобата лития в кристаллах X-среза (приблизительно составляет 0.65), n_e – показатель преломления, g – расстояние между электродами.

Полуволновое напряжение V_{π} , которое вызывает фазовый сдвиг π , рассчитывается по формуле [4]

$$V_{\pi} = -\frac{\lambda g}{n_e^3 r_{33} L \Gamma}.$$

Сдвиг фазы равен

$$\Delta\varphi = -\frac{\pi U}{V_{\pi}}. \quad (1)$$

При заданной геометрии электродов для более длинных длин волн V_{π} выше, чем для более коротких (табл. 1). Например, амплитудный модулятор AM 532 ($\lambda = 532$ нм) имеет полуволновое напряжение 2 В, а модулятор AM 1550, работающий в

телекоммуникационном диапазоне длин волн $\lambda = 1550 \text{ нм} - 5 \text{ В}$.

Табл. 1. Полуволновое напряжение амплитудных модуляторов компании JENOPTIK [4]

Тип модулятора	AM 532	AM 635	AM 830	AM 1064	AM 1550
Длина волны, нм	532	635	830	1064	1550
V_{π} , полуволновое напряжение, В	2	3	3	3	5

Поскольку максимальное допустимое напряжение составляет приблизительно $\pm 30 \text{ В}$ [4], для модуляторов серии AM компании JENOPTIK мо-

гут быть достигнуты фазовые сдвиги между 15π при 532 нм и 6π при 1550 нм .

В табл. 2 приведены параметры ВЧ цепей модуляторов Маха-Цендера компании iXBlue Photonics (Франция) [7]. Модуляторы компании iXBlue Photonics имеют сопротивление ВЧ входа $R_{ВЧ}=50 \text{ Ом}$ и допустимое напряжение смещения от -20 до $+20 \text{ В}$.

Из табл. 1 и 2, а также из проведенных расчетов следует, что максимальный допустимый индекс модуляции $\Delta\varphi_{\text{МАКС}}$ больше у электрооптических модуляторов Маха-Цендера с меньшей длиной волны лазерного излучения. Для конкретного применения (частоты) значение полуволнового напряжения на частоте модуляции $V_{\pi\text{RF}}$ уточняется по документации модулятора или определяется экспериментально [8].

Табл. 2. Параметры ВЧ цепей модуляторов Маха-Цендера компании iXBlue Photonics [7]

Тип модулятора	NIR-MX 800-LN-10	NIR-MX 950-LN-20	NIR-MX -LN-10	MX1300 -LN-10	MXAN -LN-10	MX2000 -LN-10
Параметры						
λ , Рабочая длина волны, нм	800 (780–850)	900 (850–960)	1060 (980–1150)	1310 (1290–1330)	1550 (1530–1625)	2050 (1900–2200)
Полоса модуляции, ГГц	До 12	До 25	До 12	До 12	До 12	До 12
$V_{\pi\text{RF}@50\text{kHz}}$, В	3.5	3.5-4.5	3.5	4.5	5.5	9.5
$V_{\pi\text{DC}}$ статическое, В	3.5	3.9-4.5	4.5	5.5	6.5	11
Максимальная входная мощность модулирующего сигнала $P_{ВЧ}$, Вт	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63

3. Передаточная функция идеального модулятора Маха-Цендера

Зависимость выходной мощности лазерного излучения модулятора от приложенного к электродам напряжения (передаточная функция модулятора Маха-Цендера) имеет вид:

$$I_{\text{ВЫХ}} = \frac{I_0}{2} (1 + \cos \frac{\pi U}{V_{\pi}}) = \frac{I_0}{2} (1 + \cos \Delta\varphi), \quad (2)$$

где I_0 – входная мощность излучения лазера с учетом потерь в Y-разветвителях, U – подаваемое на электроды модулятора напряжение, V_{π} – полуволновое напряжение, $\Delta\varphi$ – разность фаз интерферирующих пучков.

На рис. 5 приведена зависимость выходной оптической мощности идеального (симметричного) модулятора от разности фаз интерферирующих лазерных пучков (приложенного к электродам напряжения). Рабочая точка модулятора в зависимости от целевого применения модулятора выбирается подачей постоянного напряжения U_C (V_{bias}) на DC электроды (рис. 2).

Точка 1 соответствует рабочей точке при напряжении смещения $U_C = 0$. Подавая на DC электроды модулятора постоянное напряжение

смещения рабочей точки U_C , равное $V_{\pi\text{DC}}/2$, $3V_{\pi\text{DC}}/2$ или $-V_{\pi\text{DC}}/2$, можно перевести работу модулятора в точки 2, 3 или 4 (линейный участок, область квадратуры). При подаче напряжения смещения равного $V_{\pi\text{DC}}$ устанавливается рабочая точка 5.

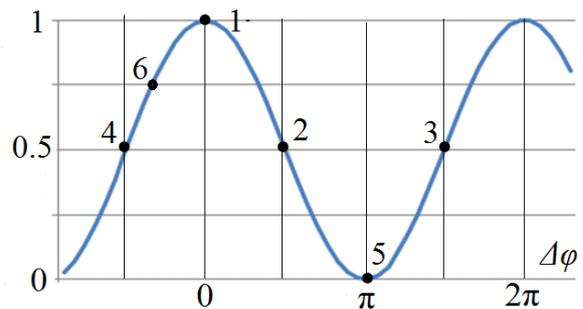


Рис. 5. Передаточная функция идеального модулятора Маха-Цендера, зависимость мощности излучения (2) на выходе симметричного модулятора (интерферометра) от разности фаз $\Delta\varphi$

Без смещения рабочей точки ($U_C = 0$, рабочая точка 1 на рис. 5) напряжение фотоприемника с линейной характеристикой $U_{\text{ФП}}$ равно:

$$U_{\text{ФП}} = U_m (1 + \cos \Delta\varphi). \quad (3)$$

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

$$U_{ФП} = U_m \cos \Delta\varphi. \quad (4)$$

4. Электрооптический модулятор Маха–Цендера как множитель частоты

4.1. Генерация четных гармоник

Подадим (рис. 2) на RF-электроды напряжение с частотой f ($U_c = 0$):

$$U_1 = U_M \sin 2\pi ft = U_M \sin \omega t.$$

В рабочей точке 1 (рис. 5) сигнал на выходе фотоприемника (4) будет равен

$$U_{ФП1} = U_m \cos(\Delta\varphi_1 \sin \omega t). \quad (5)$$

Величина $\Delta\varphi_1$ (индекс модуляции СВЧ сигналом) равна максимальному изменению разности фазы модулированного интерферирующего излучения:

$$\Delta\varphi_1 = \frac{\pi U_M}{V_{\pi RF}}, \quad (6)$$

где U_M – амплитуда модулирующего напряжения, $V_{\pi RF}$ – полуволновое напряжение RF электродов на частоте модуляции.

Используя формулу Якоби–Ангера (Jacobi–Anger)

$$\begin{aligned} \cos(\beta \sin \omega t) = & J_0(\beta) + 2J_2(\beta) \cos 2\omega t + \\ & + 2J_4(\beta) \cos 4\omega t + 2J_6(\beta) \cos 6\omega t + \dots, \quad (7) \end{aligned}$$

получим разложение сигнала фотоприемника (5) по функциям Бесселя:

$$\begin{aligned} U_{ФП1} = & U_m [J_0(\Delta\varphi_1) + 2J_2(\Delta\varphi_1) \cos 2\omega t + \\ & + 2J_4(\Delta\varphi_1) \cos 4\omega t + 2J_6(\Delta\varphi_1) \cos 6\omega t + \dots], \quad (8) \end{aligned}$$

где J_0 , J_2 , J_4 и J_6 – функции Бесселя первого рода 0, 2, 4 и 6 порядков (рис. 6).

Спектр сигнала ФП состоит из постоянной составляющей и четных гармоник. Максимальной второй гармоникой 2ω будет при $\Delta\varphi_1=3.05$. При этом разложение (8) примет вид:

$$\begin{aligned} U_{ФП1} = & U_m [-0.28 + 0.97 \cos 2\omega t + \\ & + 0.2775 \cos 4\omega t + 0.025 \cos 6\omega t \dots] \quad (9) \end{aligned}$$

Спектр сигнала (9) приведен на рис. 7.

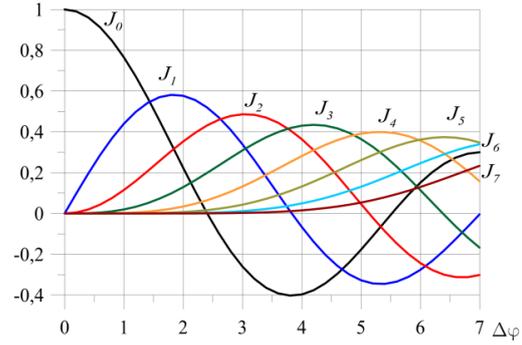


Рис. 6. Графики функции Бесселя первого рода 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7-го порядков

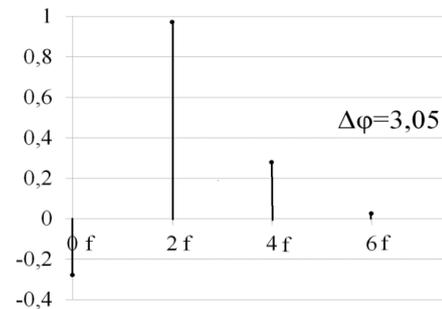


Рис. 7. Спектр сигнала ФП при работе ММЗ в рабочей точке 1 и $\Delta\varphi_1=3.05$

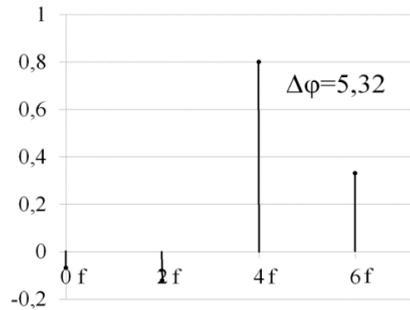


Рис. 8. Спектр сигнала ФП при работе ММЗ в рабочей точке 1 и $\Delta\varphi_1=5.32$

При возможности увеличения амплитуды модулирующего сигнала до $\Delta\varphi_1=5.32$ (максимум четвертой гармоники 4ω) в спектре сигнала ФП (рис. 8) можно получить 4-ю и 6-ю гармоники:

$$\begin{aligned} U_{ФП1} = & U_m [-0.069 - 0.122 \cos 2\omega t + \\ & + 0.80 \cos 4\omega t + 0.33 \cos 6\omega t + 0.055 \cos 8\omega t + \dots]. \end{aligned}$$

Необходимую амплитуду модулирующего напряжения можно получить из (6):

$$U_M = \frac{\Delta\varphi_1 V_{\pi RF}}{\pi}.$$

Для $\Delta\varphi_1=5.32$ (максимум четвертой гармоники 4ω) амплитуда модулирующего напряжения равна

$$U_M = \frac{5.32 V_{\pi RF}}{\pi} = 1.7 V_{\pi RF}. \quad (10)$$

Выводы: без смещения рабочей точки (а также в рабочей точке 5 рис.5) электрооптический модулятор Маха-Цендера позволяет умножить частоту сигнала в 2, 4 и 6 раз (получить четные гармоники).

Если модулятор допускает больший индекс модуляции $\Delta\varphi_1$ (6), можно получить четные гармоники большего порядка.

Рассмотрим возможность определения $V_{\pi RF}$. Для этого следует перевести реальный модулятор в режим работы в точке 1 рис. 5. Посредством поддачи напряжения смещения рабочей точки U_C контролируется спектр сигнала фотоприемника. Устанавливается режим, при котором на интересующей частоте присутствуют только четные гармоники. Затем, увеличивая амплитуду модулирующего сигнала, следует добиться отсутствия второй гармоники. При этом амплитуда четвертой гармоники будет близка к максимальной (см. рис. 6). В соответствии с (8) амплитуду второй гармоники определяет функция Бесселя первого рода 2-го порядка $J_2(\Delta\varphi_1)$. Она равна нулю при $\Delta\varphi_1=5.136$ (рис. 6). По измеренному U_M из (6) можно вычислить $V_{\pi RF}$ на частоте модуляции:

$$V_{\pi RF} = \frac{\pi U_M}{\Delta\varphi_1} = \frac{\pi U_M}{5.136} = 0.61U_M.$$

4.2. Генерация нечетных гармоник

На линейном участке передаточной функции модулятора в области квадратуры (рабочая точка 4 на рис. 5, $U_C=-0.5V_{\pi DC}$) сигнал ФП равен

$$U_{\PhiП4} = U_m \cos(\Delta\varphi_4 \sin \omega t - 90^\circ) = U_m \sin(\Delta\varphi_4 \sin \omega t).$$

Используя формулу Якоби-Ангера

$$\sin(\beta \sin \omega t) = 2J_1(\beta) \sin \omega t + 2J_3(\beta) \sin 3\omega t + 2J_5(\beta) \sin 5\omega t + \dots, \quad (11)$$

получим разложение сигнала фотоприемника $U_{\PhiП4}$ по функциям Бесселя:

$$U_{\PhiП4} = U_m [2J_1(\Delta\varphi_4) \sin \omega t + 2J_3(\Delta\varphi_4) \sin 3\omega t + 2J_5(\Delta\varphi_4) \sin 5\omega t + \dots].$$

Спектр сигнала фотоприемника $U_{\PhiП4}$ состоит из нечетных гармоник. Первая гармоника максимальна при $\Delta\varphi_4=1.84$:

$$U_{\PhiП4} = U_m [1.16 \sin \omega t + 0.21 \sin 3\omega t + 0.01 \sin 5\omega t + \dots].$$

Третья гармоника максимальна при $\Delta\varphi_4=4.20$ (рис. 6, рис. 9):

$$U_{\PhiП4} = U_m [-0.2773 \sin \omega t + 0.8688 \sin 3\omega t + 0.3123 \sin 5\omega t + 0.0404 \sin 7\omega t + \dots].$$

Пятая гармоника максимальна при $\Delta\varphi_4=6.42$ (рис. 6, рис. 10):

$$U_{\PhiП4} = U_m [-0.3524 \sin \omega t - 0.0237 \sin 3\omega t + 0.7482 \sin 5\omega t + 0.3434 \sin 7\omega t + 0.0674 \sin 9\omega t + \dots]. \quad (12)$$

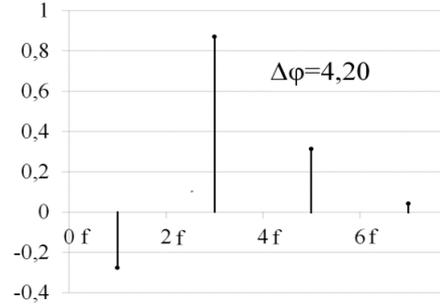


Рис. 9. Спектр сигнала ФП при работе MMZ в рабочей точке 4 и $\Delta\varphi_4=4.20$

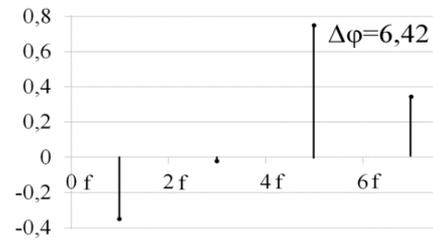


Рис. 10. Спектр сигнала ФП при работе MMZ в рабочей точке 4 и $\Delta\varphi_4=6.42$

Таким образом, при смещении рабочей точки на $+0.5V_{\pi DC}$ или $-0.5V_{\pi DC}$ (рабочие точки 2 или 4 на рис. 5) электрооптический модулятор Маха-Цендера позволяет получить 3, 5 и 7-ю гармоники (получить нечетные гармоники). Пятая гармоника максимальна (рис. 10) при $\Delta\varphi_4=6.42$, при амплитуде модулирующего напряжения:

$$U_M = \frac{\Delta\varphi_4 V_{\pi RF}}{\pi} = 2.04V_{\pi RF}.$$

Если модулятор допускает большие U_M , можно получить нечетные гармоники большего порядка.

Динамическое полуволновое напряжение электрооптического модулятора (Dynamic half-wave voltage) $V_{\pi RF}$ можно определить при меньшей чем в п. 4.1 амплитуде модулирующего напряжения. Для этого следует перевести реальный модулятор в режим работы в точке 4 или 2 рис. 5. Изменяя напряжение смещения рабочей точки U_C , контролируется спектр сигнала фотоприемника. Устанавливается режим, при котором присутствуют только нечетные гармоники. Затем, увеличивая амплитуду модулирующего сигнала U_M , следует добиться отсутствия первой гармоники, при этом амплитуда третьей гармоники будет близка к максимальной (см. рис. 6). В соответствии с (11) амплитуду первой гармоники определяет функция Бесселя первого рода 1 порядка $J_1(\Delta\varphi_4) \sin \omega t$. Она равна нулю при $\Delta\varphi_4=3.83$ (рис. 6). По измеренному

U_M из (6) можно определить $V_{\pi RF}$ на частоте модуляции:

$$V_{\pi RF} = \frac{\pi U_M}{\Delta \varphi_4} = \frac{\pi U_M}{3.83} = 0.82 U_M.$$

4.3 Генерация спектра с четными и нечетными гармониками

При напряжении смещения $U_C = -0.25 V_{\pi DC}$ (точка б на рис. 5, $\varphi_C = -\pi/4 = -45^\circ$) сигнал фотоприемника равен

$$U_{\Phi П 6} = U_m \cos(\Delta \varphi_6 \sin \omega t - 45^\circ) = 0.707 U_m [\cos(\Delta \varphi_6 \sin \omega t) - \sin(\Delta \varphi_6 \sin \omega t)]. \quad (13)$$

В результате разложения по гармоническим составляющим (7) и (11) получим:

$$U_{\Phi П 6} = 0.707 U_m [J_0(\Delta \varphi_6) + 2J_2(\Delta \varphi_6) \cos 2\omega t + 2J_4(\Delta \varphi_6) \cos 4\omega t + 2J_6(\Delta \varphi_6) \cos 6\omega t + \dots - 2J_1(\Delta \varphi_6) \sin \omega t - 2J_3(\Delta \varphi_6) \sin 3\omega t - 2J_5(\Delta \varphi_6) \sin 5\omega t - \dots]. \quad (14)$$

В сигнале фотоприемника (14) присутствуют и четные, и нечетные гармоники. Спектр сигнала фотоприемника при $\Delta \varphi_6 = 4.5$ (рис. 11) примет вид:

$$U_{\Phi П 6} = 0.707 U_m [-0.32 + 0.46 \sin \omega t + 0.436 \cos 2\omega t - 0.85 \sin 3\omega t + 0.6968 \cos 4\omega t - 0.389 \sin 5\omega t + 0.168 \cos 6\omega t - 0.06 \sin 7\omega t + \dots]. \quad (15)$$

Изменяя напряжение смещения рабочей точки в области точки б на рис. 5, можно увеличить амплитуды четных гармоник и уменьшить амплитуды нечетных гармоник или наоборот.

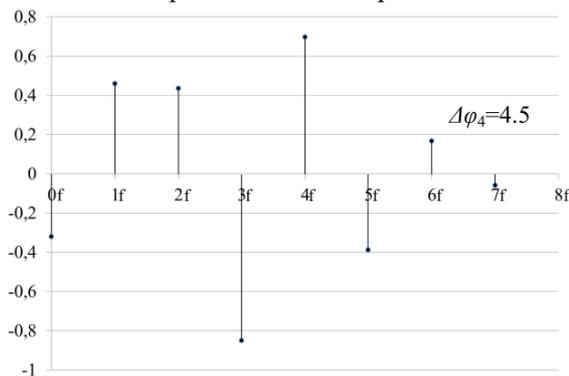


Рис. 11. Спектр сигнала фотоприемника при $U_C = -0.25 V_{\pi DC}$ и $\Delta \varphi_6 = 4.5$

Таким образом, при напряжении смещения рабочей точки $U_C = -0.25 V_{\pi DC}$ (рис. 5 рабочая точка б) электрооптический модулятор Маха–Цендера позволяет получить и четные, и нечетные гармоники: 2, 3, 4, 5 и 6. Для $\Delta \varphi_6 = 4.5$ амплитуда модулирующего напряжения равна

$$U_M = \Delta \varphi_6 \frac{V_{\pi RF}}{\pi} = 1.43 V_{\pi RF}.$$

Если модулятор допускает большие напряжения модуляции U_M и $\Delta \varphi_6$, можно получить гармоники большего порядка.

В статье сотрудников Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева [9] представлены результаты проведенных экспериментальных исследований умножителя частоты ВЧ-сигнала на два. В радиофотонном умножителе частоты ВЧ-сигналов использовался модулятор ИМ-1550-20 компании Optilab (США).

Модулятор интенсивности ИМ-1550-20 имеет следующие основные параметры [10]: частотный диапазон до 20 ГГц; $V_{\pi@10 \text{ ГГц}} (RF \text{ Port}) \leq 6.5 \text{ В}$; RF Input power 0.398 Вт; $V_{\pi@DC} (Bias \text{ Port}) \leq 10 \text{ В}$.

Модуляционная характеристика модулятора и полувольтное напряжение $V_{\pi DC}$ получены двумя путями [9]: с помощью непосредственного измерения ($V_{\pi DC} = 5.1 \text{ В}$) и косвенного измерения по уровню первой гармоники ($V_{\pi DC} = 5.4 \text{ В}$). Экспериментально измерена зависимость уровня первой и второй гармоник от местоположения рабочей точки на модуляционной характеристике. В квадратуре наблюдается максимум на основной частоте. При смещении рабочей точки происходят возрастание уровня второй гармоники и понижение уровня первой. Для используемого в эксперименте модулятора для осуществления умножения частоты входного ВЧ-сигнала на два нужно подать постоянное смещение 2.3 В. При положении рабочей точки в экстремуме модуляционной характеристики первая гармоника подавлена, а вторая растет линейно с ростом мощности модулирующего сигнала (в эксперименте до 16 дБм). В спектре присутствует только вторая гармоника.

Если мощность модулирующего напряжения была бы увеличена до максимально допустимого значения 0.398 Вт, то кроме второй гармоники появилась бы и четвертая гармоника.

5. Схема умножения частоты с двумя модуляторами Маха–Цендера

Увеличение амплитуды модулирующего сигнала U_M в пределах допустимого значения для RF электродов не обеспечивает существенного увеличения кратности умножения частоты. Дальнейшее увеличение коэффициента умножения частоты возможно путем введения дополнительного модулятора Маха–Цендера. Функциональная схема (рис. 12) состоит из лазера, оптического Y-образного разветвителя, двух модуляторов Маха–Цендера (ММЗ1 и ММЗ2), двух фотоприемников (ФД1 и ФД2) и избирательного усилителя (полосового фильтра).

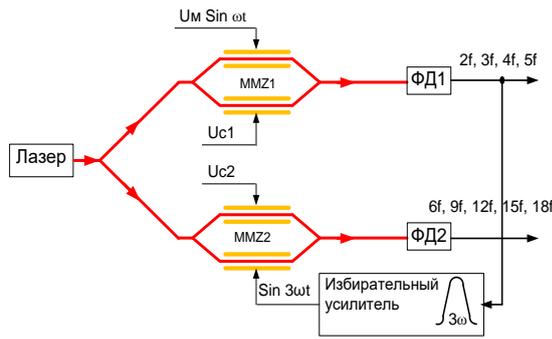


Рис. 12. Умножитель частоты с двумя модуляторами Маха-Цендера

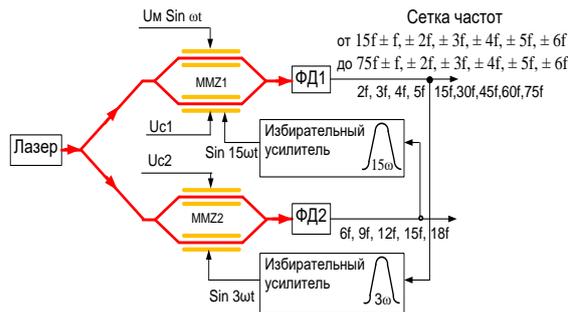


Рис. 13. Умножитель частоты с двумя модуляторами Маха-Цендера и двумя избирательными усилителями

Рассмотрим вариант подачи на модуляторы напряжения смещения рабочей точки равного $U_C = U_{C1} = U_{C2} = -0.25V_{\pi DC}$. Из сигнала фотоприемника ФД1 избирательным усилителем (полосовым фильтром) выделяется третья гармоника $J_3(\Delta\varphi)\sin 3\omega t$ и подается на второй электрооптический модулятор MMZ2. На выходе ФД2 образуются дополнительные спектральные составляющие с частотами $6f, 9f, 12f, 15f$ и $18f$. При использовании избирательного усилителя на частоту 4ω можно получить спектральный ряд, состоящий из составляющих с частотами $8f, 12f, 16f, 20f$ и $24f$.

В схеме на рис. 13 с подачей спектральной составляющей, например, $15f$ с выхода ФД2 на MMZ1 появляется возможность получения сетки частот. В схеме в качестве MMZ1 целесообразно применить Dual Drive Mach-Zehnder (DDMZ) модулятор (рис. 4) с отдельными RF1 и RF2 входами [5].

Схемы с двумя электрооптическими модуляторами Маха-Цендера увеличивают возможности умножителей частоты, что позволяет получить сетку частот.

6. Формирование импульсных сигналов

Импульсный сигнал, разложенный в ряд Фурье, имеет вид:

$$U_i = U \left[\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right].$$

Модулятор Маха-Цендера в режиме генерации нечетных гармоник ($U_C = \pm 0.5V_{\pi DC}$) формирует сигнал (11). При $\Delta\varphi = 2,3$ соотношения величин 1 и 3 гармоник соответствуют сигналу прямоугольных импульсов:

$$U_i = U \left[\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{40} \sin 5\omega t + \dots \right].$$

Поэтому модулятор Маха-Цендера в режиме генерации нечетных гармоник может использоваться с некоторым приближением как преобразователь синусоидального напряжения в импульсное.

Заключение

1. Как умножитель частоты модулятор Маха-Цендера в зависимости от напряжения смещения позволяет получать только четные или только нечетные гармоники, а также и четные, и нечетные гармоники.

2. Максимальный допустимый индекс модуляции $\Delta\varphi_{MAX}$ при заданной геометрии электродов больше у электрооптических модуляторов Маха-Цендера с меньшей длиной волны лазерного излучения.

3. Максимальная частота гармоник ограничена допустимой амплитудой напряжения для RF электродов. Дальнейшее значительное увеличение коэффициента умножения частоты возможно в схемах с двумя и более модуляторами Маха-Цендера.

4. Схема с двумя модуляторами Маха-Цендера позволяет сформировать сетку частот.

5. Модулятор Маха-Цендера в режиме генерации нечетных гармоник с некоторым приближением может использоваться как преобразователь синусоидального напряжения в периодическое напряжение близкое к импульсному.

6. Основным преимуществом радиофотонных умножителей частоты является широкая полоса рабочих частот, которая определяется граничными частотами работы модулятора и фотоприемника [7, 9].

Список литературы

1. Белоусов А. А., Вольхин Ю. Н., Гамиловская А. В., Дубровская А. А., Тихонов Е. В. О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн // Прикладная фотоника. 2014. № 1. С. 65–86.
2. Насыбуллин А. Р., Морозов О. Г., Веденькин Д. А., Рябова Н. В., Иванов В. А. Радиофотонный синтез сложных радиосигналов с линейной частотной модуляцией // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2015. № 12. С. 35–39.

3. Интегрально-оптический модулятор для широкополосных систем телекоммуникаций и радиофотоники. АО ПНППК. Руководитель проекта: Шамрай А. В. URL: http://fcpir.ru/participation_in_program/contracts/14.604.21.0055/ (дата обращения: 14.10.2019)
4. Integrated-optical modulators. Technical information and instructions for use. URL: <https://www.jenoptik.com/products/optoelectronic-systems/light-modulation/integrated-optical-modulators-fiber-coupled>
5. 10 Gb/s Dual Drive Mach-Zehnder (DDMZ) Modulator JDS Uniphase Corporation URL: http://www.lightwavestore.com/product_data_sheet/OSC...pdf1.pdf
6. ГОСТ 15093-90 Лазеры и устройства управления лазерным излучением. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов. 1990. 28 с.
7. Каталог. Специальные Системы. Фотоника. Модуляторы. URL: <http://www.sphotonics.ru/Продукция> (дата обращения: 14.10.2019)
8. IEC 62802:2017 Measurement methods of a half-wavelength voltage and a chirp parameter for Mach-Zehnder optical modulators in high-frequency radio on fiber (RoF) Systems, International Standard, 2017, C.22.
9. Бирюков В. В., Грачев В. А., Лобин С. Г., Палачев М. А., Раевский А. С. Применение электрооптического модулятора интенсивности в устройствах преобразования частоты радиосигналов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Энергетические системы и комплексы. 2017. № 2 (117). С. 49–55.
10. IM-1550-20-PM1550 nm, 20 GHz Intensity Modulator. URL: <http://www.sphotonics.ru/IM-1550-20-PM.pdf> (дата обращения: 14.10.2019)
1. Nasybullin A. R., Morozov O. G., Vedenkin D. A., Ryabova N. V., Ivanov V. A. Radio photonic synthesis of complex radio signals with linear frequency modulation. *Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and Technical Sciences*, 2015, no. 12. pp. 35–39 (In Russian).
2. Shamray A. V. An integrated optical modulator for broadband telecom systems and radio photonics. PNPCK (In Russian). URL: http://fcpir.ru/participation_in_program/contracts/14.604.21.0055/ (access date: 14.10.2019)
3. Integrated-optical modulators. Technical information and instructions for use. URL: <https://www.jenoptik.com/products/optoelectronic-systems/light-modulation/integrated-optical-modulators-fiber-coupled>
4. 10 Gb/s Dual Drive Mach-Zehnder (DDMZ) Modulator JDS Uniphase Corporation URL: http://www.lightwavestore.com/product_datasheet/OSC...pdf1.pdf
5. GOST 15093-90 Lasers and laser modulation devices. Terms and definitions. Moscow: Publishing house of standards. 1992, 28 p. (In Russian).
6. Catalogue. Special system. Photonics. Modulators. URL: <http://www.sphotonics.ru/Products> (access date: 14.10.2019)
7. IEC 62802:2017 Measurement methods of a half-wavelength voltage and a chirp parameter for Mach-Zehnder optical modulators in high-frequency radio on fiber (RoF) Systems, International Standard, 2017, 22 p.
8. Biryukov V. V., Grachev V. A., Zlobin S. G., Paltcev M. A., Raevsky A. S. Application of an electro-optical modulator of the intensity of the devices for frequency conversion of radio signals. *Proceedings of the NSTU n.a. R. E. Alekseev, Power systems and complexes*, 2017, no. 2 (117), pp. 49–55 (In Russian).
9. IM-1550-20-PM1550 nm, 20 GHz Intensity Modulator. URL: <http://www.sphotonics.ru/IM-1550-20-PM.pdf> (access date: 14.10.2019)

References

1. Belousov A. A., Volkhin Yu. N., Kamilovska A. V., Dubrovskaya A. A., Tikhonov E. V. On the application of methods and means of radio photons for signal processing decimeter, centimeter and millimeter bands-new wavelengths. *Journal of Applied Photonics*, 2014, № 1. pp. 65–86 (In Russian).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Афанасьев В. М., Пономарев Р. С. Умножение частоты в электрооптическом модуляторе Маха-Цендера // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. № 1. С. 26–34. doi: 10.17072/1994-3598-2020-1-26-34

Please cite this article in English as:

Afanas'ev V. M., Ponomarev R. S. The frequency multiplication in electrooptical modulator of the Mach-Zehnder. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2020, no. 1, pp. 26–34. doi: 10.17072/1994-3598-2020-1-26-34