

УДК 681.7.068/.069

В.М. Афанасьев¹, Р.С. Пономарев²

¹ Коломенский институт (филиал) Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ), Коломна, Россия

² Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ АМПЛИТУДНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ МАХА–ЦЕНДЕРА НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ, ИХ МОДИФИКАЦИИ И ФОРМАТЫ МОДУЛЯЦИИ

Дан обзор модификаций выпускаемых электрооптических модуляторов Маха–Цендера, контроллеров рабочей точки и драйверов модулирующего сигнала. Приведены схемы подключения и форматы модуляции.

Ключевые слова: электрооптические модуляторы Маха–Цендера, контроллер рабочей точки, драйвер модулирующего сигнала, схемы подключения, форматы модуляции.

V.M. Afanas'ev¹, R.S. Ponomarev²

¹ Kolomna Institute (branch) of Moscow State Engineering University (MAMI),
Kolomna, Russian Federation

² Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

ELECTROOPTICAL AMPLITUDE MODULATOR MACH-ZEHNDER BASED LITHIUM NIOBATE, THEIR MODIFICATIONS AND MODULATION FORMATS

The overview of the modifications produced electrooptic Mach-Zehnder modulators, operating point controllers and drivers of the modulating signal, the circuits connecting and modulation formats.

Keywords: electro-optic modulators Mach-Zehnder, the controller operating point, the driver of the modulating signal, wiring diagram, modulation formats.

Амплитудный электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха–Цандера является основным вариантом внешнего модулятора в аналоговых и в цифровых волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) [1, 2]. К преимуществам данного устройства относятся: высокая частота модуляции; компактность; надежность. Модуляторы

также используются в волоконно-оптических датчиках, измерительном оборудовании, передаче радиосигнала по оптоволокну, радиофотонике [3].

Волоконно-оптические линии связи имеют существенные преимущества для авиации: малый вес и объем, невосприимчивость к электромагнитным наводкам, полная взрывобезопасность, широкая полоса пропускания. Замена медных проводников оптоволокомом позволяет не только снизить вес и повысить надежность летательных аппаратов, но и снизить общую стоимость системы передачи информации на воздушном судне.

К недостаткам электрооптических модуляторов Маха–Цендера относят их высокую стоимость, а также подверженность разнообразным дрейфовым явлениям.

Модуляторы интенсивности излучения Маха–Цендера изготавливаются компаниями: iXBlue Photonics (Франция), Lumentum Holdings Inc. (США), Optilab (США), Covega (США), EOspase (США), Thorlabs (США), Oclaro (США), Laser 2000 (Великобритания), JENOPTIK (Германия), Sumitomo Osaka Cement (Япония), Fujitsu (Япония), OKI Electronics Components (Япония), Lucent Technologies (Китай), SWT (Китай), ECI (Израиль), НПК «Оптолинк» (Россия). Список неполный.

Электрооптические модуляторы Маха–Цендера (ММЗ) – модуляторы интенсивности интерферометрического типа. Схематическое изображение чипа модулятора компании iXBlue Photonics (Франция) приведено на рис. 1.

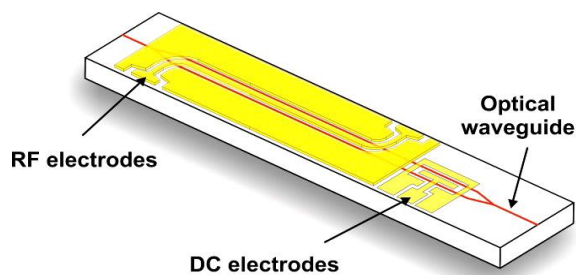


Рис. 1. Схематическое изображение чипа модулятора компании iXBlue Photonics1 [4]: RF electrodes – электроды модуляции; DC electrodes – электроды смещения; Optical waveguide – оптический волновод (световод)

ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» производит электрооптические модуляторы интенсивности

света на ниобате лития для широкополосных систем радиوفотоники и телекоммуникаций МЗМ-Х-015, МЗМ-Х-016 и МЗМ-Х-017 (рис. 2). Рабочая длина волны 1540–1560 нм. Температура эксплуатации от минус 60 до плюс 70 °С [5, 6].

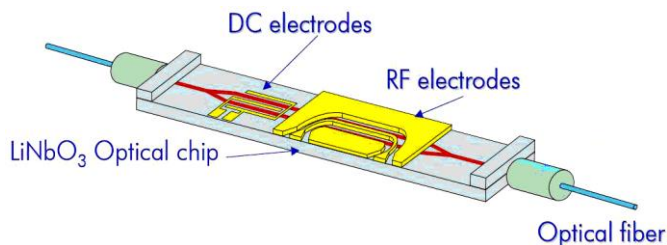


Рис. 2. Интегрально-оптический СВЧ-модулятор Маха–Цендера Пермской научно-производственной приборостроительной компании [6]: LiNbO₃ Optical chip – кристаллическая подложка (электрооптический кристалл); DC electrodes – DC-электроды смещения; RF electrodes – СВЧ-электроды в виде копланарной линии бегущей волны; Optical fiber – оптическое волокно

Модулятор представляет собой интегрально-оптическую схему, состоящую из системы канальных оптических волноводов и параллельной им системы электродов. Лазерное излучение входного световода разделяется на два пути, которые соединяются в выходном световоде (составляющие складываются когерентно). Эти два пути образуют два плеча интерферометра. Около световодов напыляют две пары электродов: RF – электроды модуляции и DC – электроды смещения рабочей точки. Для формирования электродов используется золото, в качестве адгезионного слоя используется хром. При подаче на электроды напряжения происходит изменение показателя преломления в световодах. Лазерное излучение в плечах распространяется с разными скоростями и приобретает разность фаз.

Компания Lumentum Holdings Inc. (JDSU) выпускает 10 Gb/s Dual Drive Mach-Zehnder (DDMZ) modulator, в котором электроды модулирующего сигнала RF и электроды напряжения смещения DC совмещены. Схема цепей подачи напряжений на электроды приведена в [7].

Модуляторы для аналоговой и цифровой модуляции серии AM компании JENOPTIK (Германия) также имеют совмещенные RF- и DC-электроды [8]. Вариант схемы цепей напряжения модулирующего сигнала RF и напряжения смещения рабочей точки (bias) приведен на рис. 3.

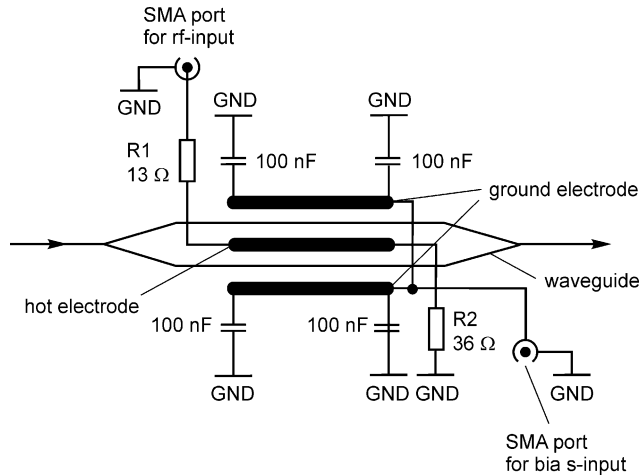


Рис. 3. Схема подключения электродов модулятора AM 1550 компании JENOPTIK [8]

Передаточной функцией интерферометра называется зависимость выходной интенсивности излучения от набегавшей в плечах разности фаз. Передаточная функция интенсивности модулятора от приложенного к электродам напряжения $V(t)$ имеет вид [4]:

$$I_{\text{out}}(t) = T_{\text{mod}} \frac{I_{\text{in}}}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{V_{\pi}} V(t) - \varphi \right) \right], \quad (1)$$

где $I_{\text{out}}(t)$ – Output intensity – интенсивность выходного излучения; I_{in} – Input intensity – интенсивность входного излучения; T_{mod} – optical transmission of the device – коэффициент передачи модулятора; V_{π} – half-wave voltage of the modulator – полуволновое напряжение модулятора (при котором разность фаз интерферирующего излучения равна π); φ – phase term – фаза.

Для идеального (со сбалансированными оптическими путями) модулятора Маха–Цендера фаза φ равна нулю. Однако в реальности всегда существует разница между двумя оптическими путями из-за неоднородности материала и допусками на изготовление. Этот дисбаланс учитывается введением фазы φ (phase term) в передаточной функции модулятора (1).

В статье [9] на рис. 1 приведена полученная экспериментально передаточная функция модулятора Маха–Цендера. На графике можно

определить полуволновое напряжение $V_\pi = 9$ В и смещение оси симметрии передаточной функции на 1,2 В, что равно смещению на $0,13 V_\pi$ и соответствует смещению на 23 град.

Передаточная функция интенсивности идеального модулятора Маха–Цендера с симметричной топологией волноводов (или при компенсации фазы φ с подачей напряжения смещения на DC-электроды) и при равенстве интенсивностей излучения в плечах интерферометра приведена на рис. 4 [4].

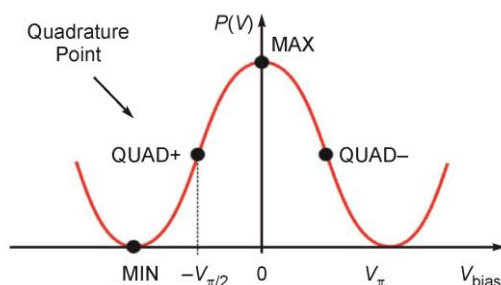


Рис. 4. Передаточная функция идеального модулятора Маха–Цендера [4]: $P(V)$ – интенсивность выходного излучения модулятора; V_{bias} – постоянное DC напряжение смещения; V_π – полуволновое напряжение; Quadrature Point (QUAD+, QUAD-) – точки квадратуры

Различают $V_{\pi_{DC}}$ – полуволновое напряжение для напряжения смещения на DC электроды и $V_{\pi_{RF}}$ – полуволновое напряжение для модулирующего напряжения на RF электроды.

Рабочая точка модулятора (MIN, QUAD+, MAX, QUAD-) в зависимости от целевого применения выбирается подачей постоянного напряжения V_{bias} на DC электроды. В рабочих точках QUAD+ и QUAD- максимальна крутизна передаточной функции и минимальны нелинейные искажения.

Компания iXBlue Photonics (Франция) производит электрооптические модуляторы Маха–Цендера на основе кристаллов ниобата лития LiNbO_3 для длин волн лазера 800, 1060, 1300, 1550 и 2000 нм [10]. Основные характеристики модуляторов приведены в табл. 1.

Основные параметры модуляторов Маха–Цендера: рабочий диапазон длин волн, полоса модуляции, вносимые потери, полуволновое напряжение, коэффициент экстинкции. Коэффициент экстинкции (Extinction ratio) – отношение максимального коэффициента пропускания оптического модулятора к минимальному (рис. 5).

Таблица 1

Основные характеристики модуляторов Маха–Цендера
компании iXBlue Photonics

Тип модулятора	NIR-MX800-LN-20	NIR-MX950-LN-20	NIR-MX-LN-20	MX 1300-LN-40	MXAN-LN-40	MX2000-LN-10
Параметры						
Operating wavelength	800 nm (780–850)	900 nm (850–960)	1060 nm (980–1150)	1310 nm (1270–1330)	1550 nm (1530–1625)	2050 nm (1900–2200)
Electro-optical bandwidth	25 GHz	25 GHz	18 GHz	30 GHz	30 GHz	12 GHz
V_{π} RF@ 50 kHz	3,5 V	3,5 V	3,5 V	4 V	5 V	9,5 V
V_{π} DC electrodes	3,9 V	3,9 V	4,5 V	5,5 V	6,5 V	11 V
Optical input power, max	13 dBm (20 мВт)	10 dBm (10 мВт)	20 dBm (100 мВт)	20 dBm (100 мВт)	20 dBm (100 мВт)	20 dBm (100 мВт)
RF input power, max	28 dBm	28 dBm	28 dBm	28 dBm	28 dBm	28 dBm
Bias voltage	$-20 \div +20$ V	$-20 \div +20$ V	$-20 \div +20$ V	$-20 \div +20$ V	$-20 \div +20$ V	$-20 \div +20$ V
DC extinction ratio	22 dB	25 dB	25 dB	22 dB	22 dB	22 dB

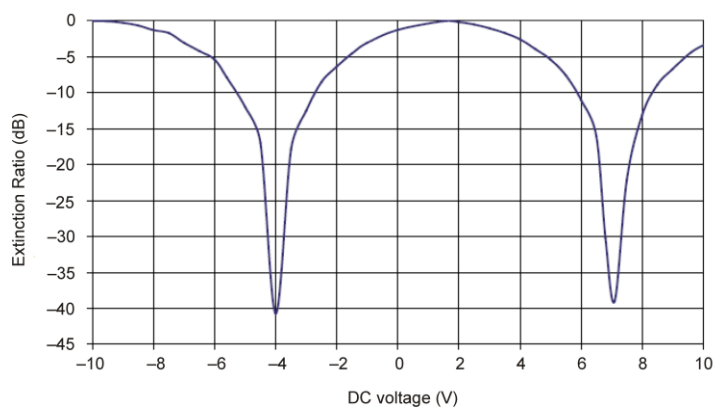


Рис. 5. Extinction ratio – коэффициент экстинкции модулятора MXER-LN-20 [11]

Компания EoSpace (США), например, предлагает в 2017 году под параметры заказчика амплитудные модуляторы на длины волн: 0,65; 0,78; 0,85; 0,98; 1,06; 1,3; 1,55; 1,7 и 2 мкм со скоростями передачи данных до 60 ГГц [12].

С рабочим диапазоном длин волн 1530–1625 нм компанией iXBlue Photonics выпускаются амплитудные электрооптические модуляторы Маха–Цендера (модуляторы интенсивности): аналоговые модуляторы серии MXAR-LN (см. рис. 1), цифровые модуляторы серии MX-LN, двойной параллельный модулятор MXIQ-LN (рис. 23). Выпускаются модуляторы для специальных применений: IMZI – с высокой разностью хода (длиной оптического пути) между двумя плечами (рис. 6), Y-JPX-LN – модулятор для волоконно-оптических гироскопов (рис. 7) (длина волны 1460–1610 нм, полоса модуляции 30 МГц, полу-волновое напряжение 7В) [13].



Рис. 6. Модулятор IMZI с высокой разностью хода между двумя плечами [13]

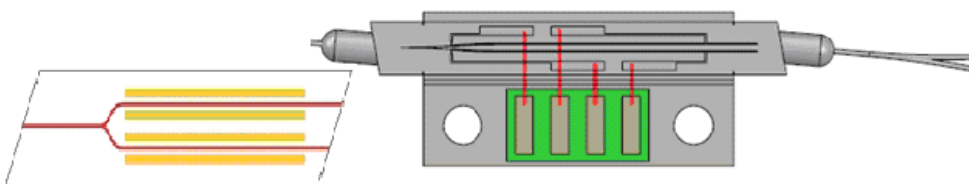


Рис. 7. Модулятор Y-JPX-LN для волоконно-оптических гироскопов [13]

Компания Optilab (США) выпускает для гироскопов модулятор МЮС-1550-PG [19]. Научно-производственная Компания «Оптолинк» (г. Зеленоград, Россия) производит многофункциональные интегрально-оптические элементы для волоконно-оптических гироскопов, выполняющие функции поляризатора, разветвителя и электрического фазового модулятора оптического излучения с длиной волны 830 и 1550 нм [20].

На рис. 8 представлен LiNbO_3 модулятор компании SWT (Китай). Он состоит из последовательно подключенных модулятора Маха–Цендера и фазового модулятора. Продукция компании используется в китайской аэрокосмической отрасли, на высокоскоростных железнодорожных магистралях, в системах связи и нефтяной промышленности [14].



Рис. 8. Электрооптический модулятор компании SWT (Китай) модели STM1550, предназначенный для кабельного телевидения [14]

Для обеспечения модуляторов соответствующими по параметрам электрическими напряжениями (DC напряжением смещения и RF модулирующим напряжением) компания iXBlue Photonics выпускает MBC (Modulator Bias Controller) контроллеры рабочей точки и DR-драйверы (формирователи) модулирующего сигнала [4, 10].

Контроллеры рабочей точки

Контроллеры MBC разработаны для установки рабочей точки электрооптических модуляторов в любой точке их передаточной функции, а также компенсации дрейфа, присущего модуляторам Маха–Цендера из-за старения и при изменении параметров окружающей среды (обеспечивают стабильную эксплуатацию в течение длительного времени и изменении условий окружающей среды).

Дрейф рабочей точки проявляется в медленном дрейфе напряжения V_{bias} (рис. 9), прикладываемого к электродам DC для удержания интерферометра модулятора в необходимой рабочей точке.

Существуют внешние и внутренние источники дрейфа рабочей точки. Способом борьбы с дрейфом рабочей точки является использование систем автоматического регулирования с обратной связью. Часть мощности с выхода модулятора направляется на фотодетектор, который преобразует оптическую мощность в электрический сигнал, используемый для коррекции напряжения смещения.

В результате работы контроллера MBC-AN поддерживается стабильность выходного излучения модулятора при температурах от -10 до $+45$ °C в рабочих точках QUAD+ и QUAD- на уровне $\pm 0,1$ dB (рис. 10) [15].

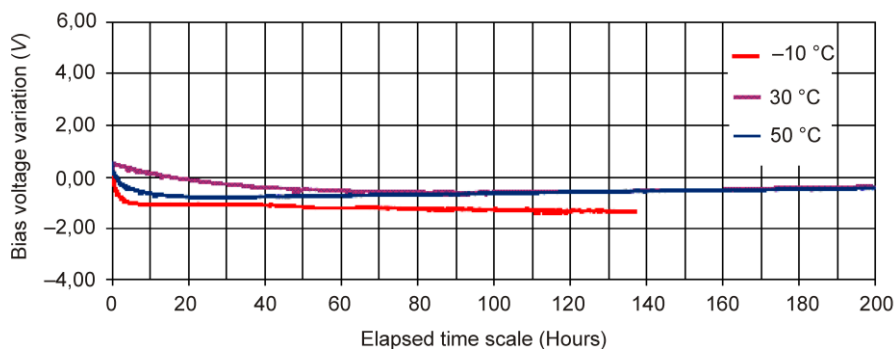


Рис. 9. Дрейф напряжения V_{bias} модуляторов MXER-LN [11]: Bias voltage variation – напряжение смещения; Elapsed time scale (hours) – прошедшее время (ч)

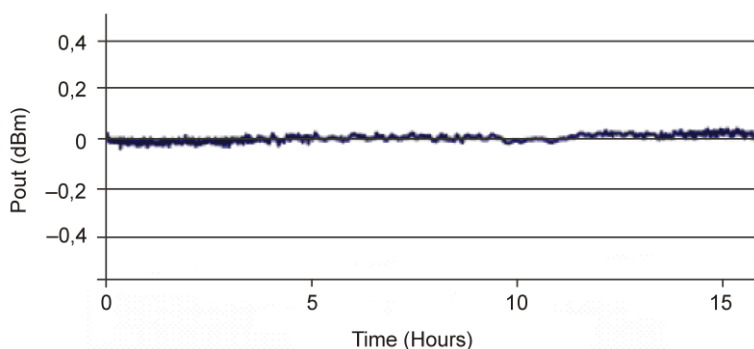


Рис. 10. Стабильность выходной мощности модулятора с MBC-AN [15]

Контроллеры серии MBC-AN не накладывают никакого дополнительного сигнала на оптический модулированный сигнал, без добавочного сигнала (ditherless). Такие контроллеры применяются в системах, где важна чистота модулированного сигнала, например, для аналоговых линий передачи (радиофотоника). Контроллеры серии MBC-AN работают на основе принципа сравнения оптической мощности до и после модулятора Маха–Цендера (рис. 11). Для их работы требуется использование волоконного ответвителя с фотодиодом обратной связи. Контроллеры серии MBC-AN управляются с помощью специального программного обеспечения для ПК. Контроллеры MBC-AN оптимизированы для аналоговых приложений.

Для импульсных и цифровых систем разработаны контроллеры серии MBC-DG [16]. Принцип работы контроллеров основан на ис-

пользовании добавочного возмущающего сигнала (dither signal). Сигнал с небольшой амплитудой и низкой частотой накладывается на модулирующий сигнал. Результирующий оптический сигнал модуляции детектируется и с помощью цифровой обработки рабочая точка модулятора фиксируется в нужном положении. Органы управления на передней панели позволяют настроить параметры контроля смещения (амплитуду, частоту добавочного возмущающего сигнала от 400 до 1400 Hz) и положение рабочей точки на передаточной характеристике.

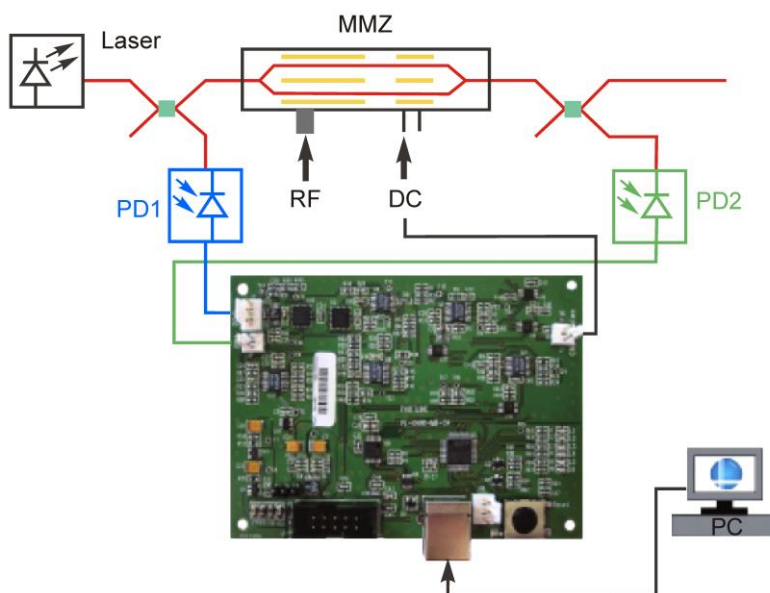


Рис. 11. Функциональная схема контроллера рабочей точки с платой MBC-AN-board [15]

Для систем, состоящих из лазера, модулятора Маха–Цендера, источника сигнала и RF усилителя, компания Thorlabs выпускает полнофункциональный контроллер смещения рабочей точки MBX Modulator Bias Controller [17]. Наиболее распространенными операционными точками модулятора являются пиковые, нулевые и квадратурные точки, как показано на рис. 12. Пиковые и нулевые точки используются для получения фазовой модуляции и удвоения частоты. В режиме квадратуры пользователь может выбирать между двумя рабочими точками, выбирать наклон характеристики. Положительный наклон (Quad+) является неинвертирующим, т.е. увеличение напряже-

ния RF приводит к увеличению оптической выходной мощности модулятора. Отрицательный наклон (Quad-) является инвертирующим, т.е. увеличение напряжения RF уменьшает оптическую выходную мощность модулятора.

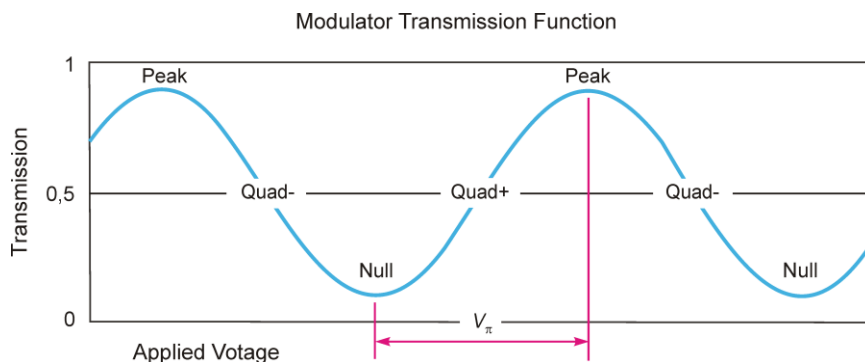


Рис. 12. Передаточная функция модулятора Маха–Цендера [17]:
Peak, Quad-, Null, Quad+ – наиболее применяемые рабочие точки модулятора

Для стабилизации рабочей точки модулятора в цепь управления смещением подается небольшое переменное напряжение (тональный сигнал – dither). Оптический выход модулятора получает небольшую модуляцию. В зависимости от радиочастотного сигнала или конкретного применения пользователь может выбирать частоту от 1 до 10 кГц и амплитуду тонального сигнала от 20 мВ до 2 В. Часть излучения с выхода модулятора поступает на линейный фотодетектор. В результате детектирования гармоник тонального сигнала вырабатывается напряжение смещения DC, обеспечивающее стабилизацию рабочей точки модулятора.

Модуляция напряжения смещения отключается при стабилизации рабочей точки по принципу «постоянное соотношение» или «постоянное смещение». В режиме «постоянное соотношение» удерживается отношение входного в модулятор излучения к выходному на постоянном значении. Режим рекомендуется для аналоговых RF-сигналов. Ручной режим позволяет настроить модулятор в любой точке передаточной функции без модуляции напряжения смещения.

Формирователи модулирующих сигналов

Чтобы получить сигналы модуляции, совместимые с входными техническими характеристиками оптических модуляторов, компания iXBlue Photonics предлагает модули усилителей-формирователей, называемых драйверами модуляторов: RF Driver DR-AN, RF Driver DR-DG, RF Driver DR-PL [10]. Они обеспечивают электрооптические модуляторы высокочастотным электрическим сигналом, оптимизированным по амплитуде (peak-to-peak), времени нарастания/спада импульсов и фазовому дрожанию.

ВЧ-модули DR-AN являются широкополосными ВЧ-усилителями, которые разработаны для применения в качестве формирователя сигнала в аналоговых линиях передачи.

ВЧ-формирователи DR-DG представляют собой универсальные драйверы для цифровых электрооптических модуляторов (для работы в форматах RZ, NRZ, DPSK и (D)QPSK).

Драйверы DR-AN-20-НО и DR-DG-20-НО – это семейство широкополосных усилителей радиочастоты с ограничением верхнего напряжения, предназначены соответственно для аналоговых и цифровых применений.

DLL-RF-30 является модулем настраиваемой линии задержки, который может использоваться для цифровых линий передачи для добавления задержки в диапазоне от 5 до 140 пс.

Драйвер электрооптического модулятора DR-PL-10-МО представляет собой ВЧ-усилитель, разработанный для генерации неискаженных оптических импульсов с малым временем нарастания/спада, без выбросов на высоком и низком уровнях. Формирователь DR-PL-10-МО оптимизирован для высоких и низких частот повторения импульсов сигналов с полосой модуляции от 50 кГц до 10 ГГц

Основной функцией модуля DFF-DG-30 (DFF, D-type Flip Flop module) является переформатирование несимметричного входного потока данных или аналогового сигнала в дифференциальный выходной сигнал. Такая функция используется для NRZ/RZ преобразования, DPSK и DQPSK дифференциального кодирования, определения фазы в схемах с автоподстройкой частоты. Также этот модуль является ключевым устройством для различных многоуровневых форматов модуляции.

Аналоговые электрооптические модуляторы Маха–Цендера

Широкополосные амплитудные электрооптические модуляторы Маха–Цендера серии MXAN-LN разработаны для передачи аналоговых сигналов в волоконно-оптических линиях связи, для применения в системах передачи сигналов на удаленные антенны (микроволновой фотоники) и системах СВЧ [11].

В аналоговом модуляторе рабочая точка выбирается на середине линейного участка (рис. 13).

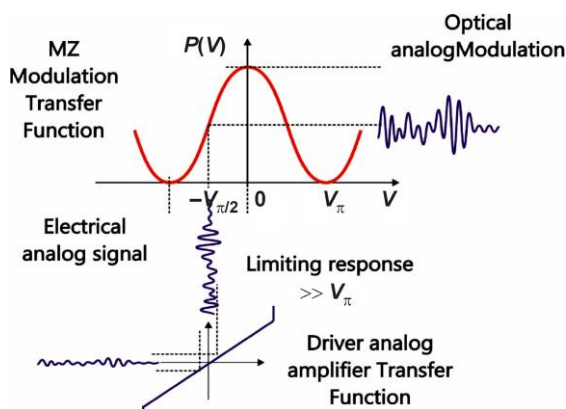


Рис. 13. Аналоговая модуляция в рабочей точке квадратуры QUAD+ [18]: MZ Modulation Transfer Function – передаточная функция модулятора; Electrical analog signal – электрический аналоговый сигнал; Limiting response – ограничительная характеристика; Driver analog amplifier Function – функция аналогового драйвера

Схема включения аналогового модулятора приведена на рис. 14 [9]. Высокочастотный формирователь DR-AN имеет равномерные характеристики на всей полосе частот и обеспечивает ограничение входного сигнала. Контроллер рабочей точки электрооптического модулятора MBC-AN-BT предназначен для смещения рабочей точки модулятора и поддержания режима работы в точке QUAD+.

В рабочей точке MIN (рис. 15) модулятор выполняет функцию умножения частоты сигнала на два.

На рис. 16 приведена схема CS-DSB модуляции, полученная последовательным включением модулятора Маха–Цендера MX-LN и фазового модулятора MPX-LN [18].

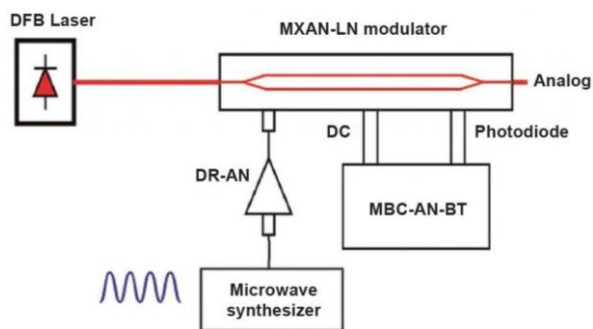


Рис. 14. Схема включения аналогового модулятора MXAN-LN [4]: DFB Laser – (Distributed feedback laser) – Лазер с распределенной обратной связью; DR-AN – драйвер (формирователь) модулирующего сигнала; MBC-AN-BT – контроллер рабочей точки; Microwave synthesizer – микроволновый генератор

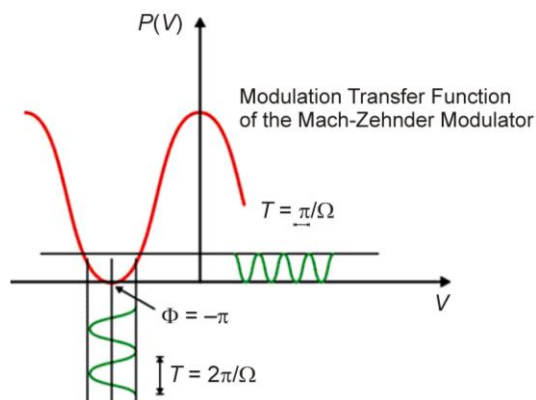


Рис. 15. Аналоговая модуляция в рабочей точке MIN [18]

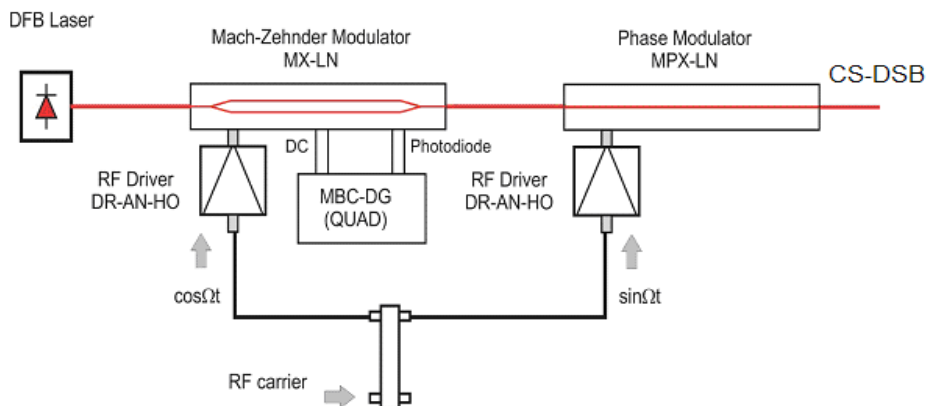


Рис. 16. Схема амплитудной модуляции CS-DSB [18]: (Carrier Suppression and Dual Side Band modulation)

Рабочая точка модулятора Маха–Цендера – QUAD+. На модулятор Маха–Цендера подается модулирующий сигнал $\cos\Omega t$ на фазовый модулятор $\sin\Omega t$.

Цифровые электрооптические модуляторы

Для оптической цифровой модуляции компанией iXBlue Photonics предлагаются цифровые электрооптические модуляторы Маха–Цендера на ниобате лития серии MX-LN. Графики модуляции в рабочей точке QUAD+ представлены на рис. 17.

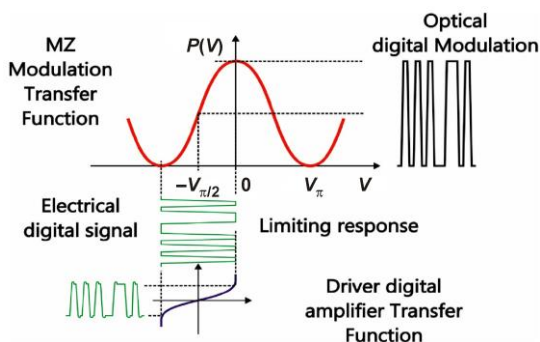


Рис. 17. Оптическая цифровая модуляция в рабочей точке QUAD+ [18]: MZ Modulation Transfer Function – передаточная функция модулятора; Electrical digital signal – электрический цифровой сигнал; Driver digital amplifier Function – функция цифрового усилителя; Limiting response – результат ограничения; Optical digital Modulation – оптическая цифровая модуляция

Схема включения цифрового модулятора MX-LN для работы в рабочей точке QUAD+ представлена на рис. 18.

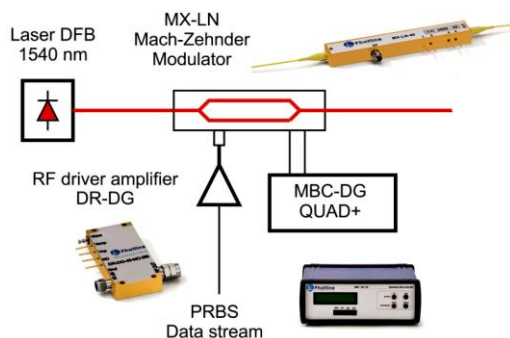


Рис. 18. Схема включения цифрового модулятора MX-LN в рабочей точке QUAD+ [18]: Data stream – поток данных (PRBS – псевдослучайная двоичная последовательность); RF driver amplifier – ВЧ усилитель, MBC-DG – контроллер рабочей точки

На рис. 19 приведены графики импульсной модуляции в рабочей точке MIN. Схема импульсной модуляции в рабочей точке MIN приведена на рис. 20.

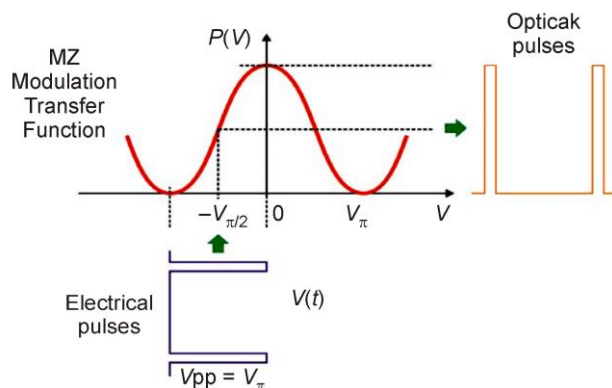


Рис. 19. Импульсная модуляция в рабочей точке MIN [18]

Модулятор NIR-MX-LN – амплитудный цифровой оптический модулятор с рабочим диапазоном длин волн 980–1150 нм с высоким коэффициентом экстинкции (контрастность).

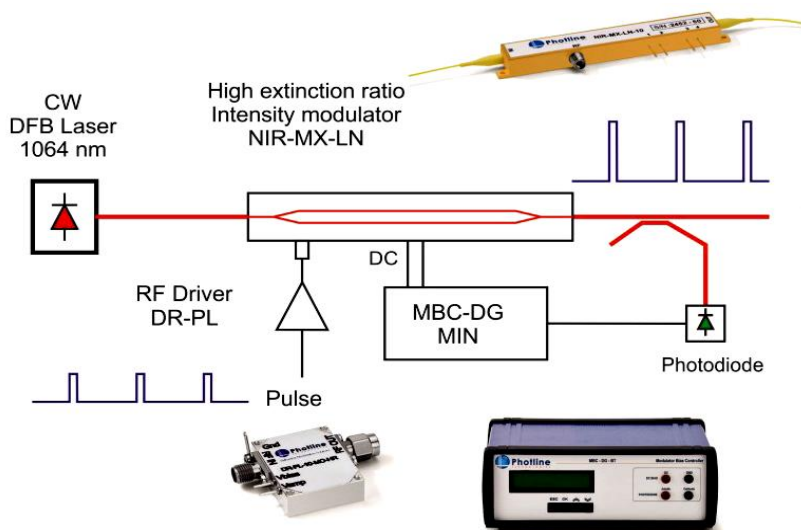


Рис. 20. Схема импульсной модуляции в рабочей точке MIN [18]

Драйвер электрооптического модулятора DR-PL-10-MO представляет собой ВЧ-усилитель, разработанный для генерации неиска-

женных оптических импульсов с коротким временем нарастания и спада (25 пс), высокой контрастностью и шириной импульса до 100 нс с частотой повторения импульсов от 50 кГц до 10 ГГц. Контроллер MBC-DG предназначен для цифровых и импульсных применений, настроен на рабочую точку MIN.

Графики цифровой модуляции в рабочей точке MIN приведены на рис. 21. В результате модуляции информация закодирована в разности фаз соседних импульсов (формат DPSK – Differential Phase Shift Keying).

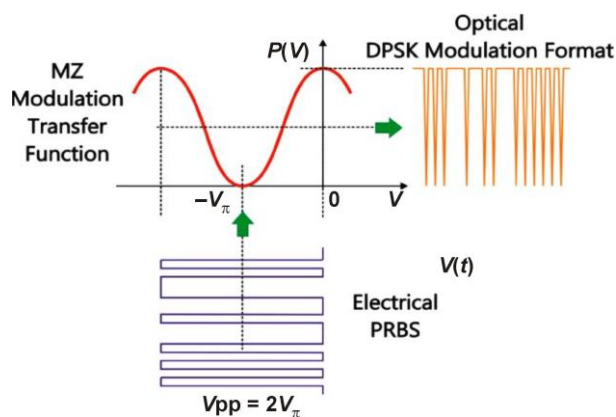


Рис. 21. Цифровая модуляция в рабочей точке MIN [18]: PRBS – псевдослучайная двоичная последовательность; DPSK (Differential Phase Shift Keying) – формат модуляции, в котором информация закодирована в разности фаз соседних импульсов

Двойной параллельный модулятор Маха–Цендера

Двойной параллельный модулятор Маха–Цендера (DPMZ – Dual Parallel Mach-Zehnder Modulator) компании JDSU предназначен для дальних и сверхдальних оптических линий связи [21]. Он используется для спектрально эффективной передачи на основе дифференциальной квадратурной фазовой манипуляции. Модулятор состоит из двух интегрированных параллельно высокоскоростных модуляторов Маха–Цендера. Кроме того, внутри расположен фазовый модулятор для введения фазового сдвига между излучением модуляторов Маха–Цендера.

Двойной параллельный модулятор Маха–Цендера компании EOspace (квадратурный модулятор) представлен на рис. 22. Он предназначен для формата модуляции QPSK [22].



Рис. 22. Двойной параллельный модулятор Маха–Цендера компании EOspace для формата модуляции QPSK [22]

Схематическое изображение чипа широкополосного амплитудного двойного параллельного модулятора MXIQ-LN-40 компании iXBlue Photonics (Photline Technologies) представлено на рис. 23 [23]. Высоко-частотные модулирующие сигналы подаются на электроды RF1 и RF2 (электроды бегущей волны с копланарным СВЧ-волноводом). Два комплекта электродов постоянного тока DC1 и DC2 позволяют контролировать рабочую точку MZ1 и MZ2 на передаточной характеристике. Постоянное напряжения DC3 устанавливает разность фаз между излучением MZ1 и MZ2.

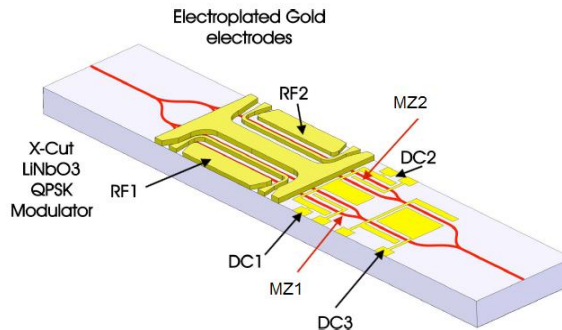


Рис. 23. Двойной параллельный модулятор MXIQ-LN-40 [23]:
RF – электроды модуляции; DC – электроды смещения

Внешний вид модулятора MXIQ-LN-40 приведен на рис. 24. Назначение выводов сведено в табл. 2.

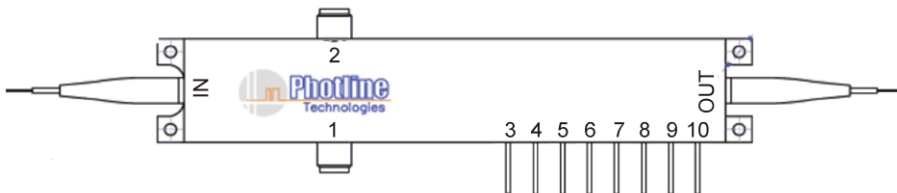


Рис. 24. Модулятор MXIQ-LN-40 [24]

Таблица 2

Выводы модулятора MXIQ-LN-40 [24]

Port	Function (назначение)	Port	Function (назначение)
IN	Optical input port	5	DC2
OUT	Optical output port	6	DC3
1	RF1 input port	7	Photodiode 1 cathode
2	RF2 input port	8	Photodiode 1 anode
3	Ground	9	Photodiode 2 cathode
4	DC1	10	Photodiode 2 anode

Для модулятора разработан контроллер рабочей точки модели MBC-IQ-BT [23]. Он может задавать и обеспечивать стабилизацию заданной рабочей точки MZ1 и MZ2 (DC1 и DC2) в MIN, MAX, QUAD+ и QUAD- в течение длительного времени эксплуатации и изменении условий окружающей среды. Обратная связь автоматически компенсирует изменения в условиях эксплуатации. Для установки разности фаз между излучением MZ1 и MZ2 предусмотрено ручное регулирование постоянного напряжения DC3.

В формате амплитудной однополосной модуляции с подавлением несущей (SSB) на электроды DC1 и DC2 подается напряжение, устанавливающее фазовый сдвиг, равный $-\pi$ (рабочая точка MIN). На электроды DC3 подается постоянное напряжение, устанавливающее фазовый сдвиг между излучением MZ1 и MZ2, равный минус $\pi/2$. На рис. 25 приведены схема включения и сигналы (напряжения), подаваемые на модулятор MXIQ-LN-40.

На рис. 26 представлена схема включения модулятора MXIQ-LN-40 для форматов модуляции: SSB (single sideband modulation) – амплитудная модуляция с одной боковой полосой, QAM (Quadrature Amplitude Modulation) – квадратурная амплитудная модуляция, DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) – дифференциальная квадратурная фазовая манипуляция, OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов [24]. Чтобы получить сигналы модуляции, совместимые с входными техническими характеристиками оптического модулятора MXIQ-LN-40, используются драйверы DR-AN-20-НО или DR-DG-20-НО с ограничением величины напряжения.

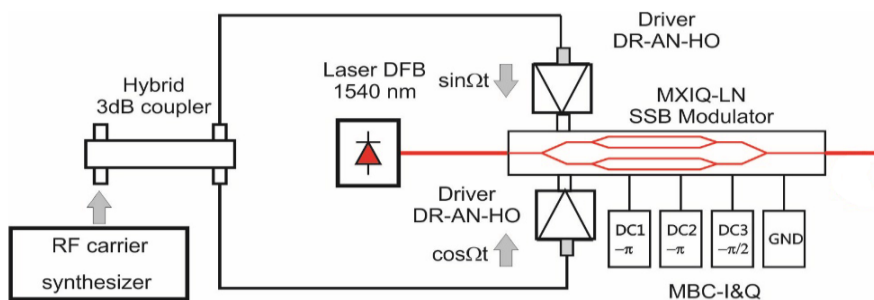


Рис. 25. Сигналы (напряжения), подаваемые на модулятор MXIQ-LN-40 при работе в режиме CS-SSB – подавления несущей и одной боковой полосы [18]

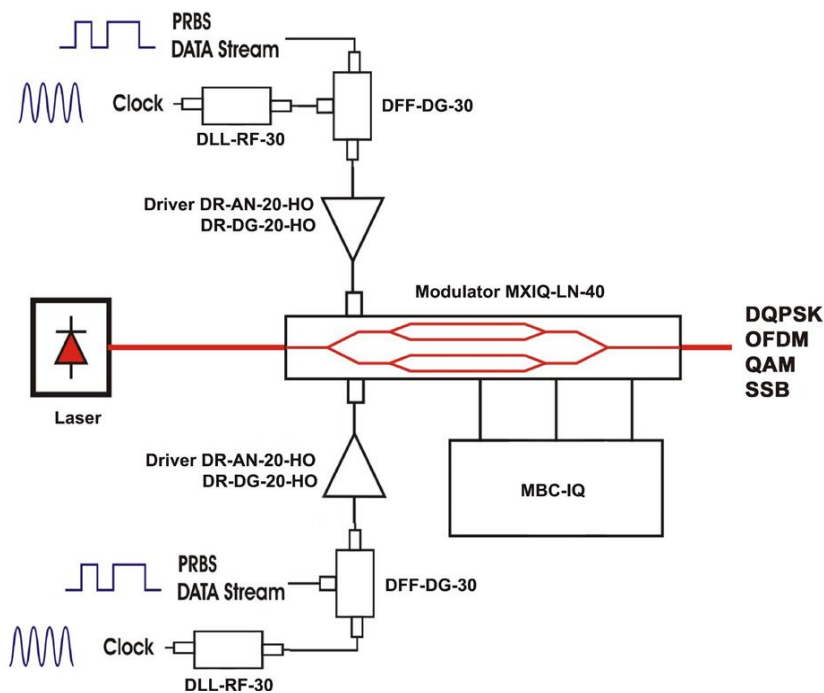


Рис. 26. Схема включения модулятора MXIQ-LN-40 [24]

Заключение

Модуляторы Маха–Цендера являются ключевым элементом передающего высокоскоростного оборудования ВОЛС. В табл. 3 приведены форматы модуляции, технические средства для их реализации на передающей и приемной стороне, а также достигнутые к 2006 году в лаборатории Bell Labs Innovations компании Lucent Technologies ско-

рости передачи информации [25]. Для скорости передачи 100 Гбит/с формата DQPSK требуются оптические и электрические компоненты только со скоростью 50 Гбит/с.

Таблица 3

Форматы модуляции и средства для их реализации [25]

Modulation format	TX	Hardware complexity	RX
NRZ-OOK		Mach-Zehnder modulator If modulator bandwidth too low	
Duobinary		Precoded Data Low pass at ~25% of bit rate (or: use limited modulator bandwidth)	
(RZ-)DPSK		Precoded Data Clock Pulse carver for RZ	
(RZ-)DQPSK		Precoded Data Clock Pulse carver (RZ) Control	

Большие перспективы применения модуляторов Маха–Цендера в системах радиофотоники (MWP – *Microwave Photonics* микроволновая фотоника) [3, 26]. На модуляторах основаны широкополосные радиофотонные аналоговые тракты с внешней модуляцией; сверхширокополосные радиофотонные преобразователи частоты (смесителя); радиофотонные высокостабильные СВЧ-автогенераторы гармонических сигналов; сверхширокополосные радиофотонные аналого-цифровые преобразователи.

Научно-производственная компания «Оптолинк» (г. Зеленоград, Россия) на основе собственных специальных модуляторов выпускает прецизионные волоконно-оптические гироскопы [20].

Первоначально электрооптические модуляторы Маха–Цендера на основе ниобата лития разрабатывались для телекоммуникационных систем. Накоплен большой опыт их изготовления и применения. Проведенные группой Н. Nagata долгосрочные испытания на старение в те-

чение четырех лет (35 000 ч) продемонстрировали исключительную надежность модуляторов Маха–Цандера на основе ниобата лития [27].

Модуляторы работают на различных длинах волн, обладают высокой надежностью. Области их применения расширяются.

Список литературы

1. Величко М.А., Наний О.Е., Сусьян А.А. Новые форматы модуляции в оптических системах связи // LIGHTWAVE Russian Edition. – 2005. – № 4. – С. 21–30.
2. Наний О.Е., Трещиков В.Н. Новое поколение DWDM-систем связи // Фотон-экспресс. – 2014. – № 4 (116). – С. 18–23.
3. О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / А.А. Белоусов, Ю.Н. Вольхин, А.В. Гамиловская, А.А. Дубровская, Е.В. Тихонов // Прикладная фотоника. – 2014. – № 1. – С. 65–86.
4. Introduction to iXBlue Mach–Zehnder Modulators Bias Controllers [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.lasercomponents.com...lc...ixblue...to-modulator-bias...>
5. Электрооптические модуляторы интенсивности света на ниобате лития для систем телеметрии и передачи информации. Производитель: «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» ОАО. Фонд промышленных каталогов. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.Промкаталог.рф ›Products?firmId=76587>.
6. Интегрально-оптический модулятор для широкополосных систем телекоммуникации и радиофотоники. (Соглашение 14.604.21.0055 на период 2014–2016 гг.; руковод. проекта: зав. лаб. Шамрай Александр Валерьевич) [Электронный ресурс]. – URL: http://www.fcpir.ru ›upload/iblock/519/..._poster.pdf.
7. Mach-Zehnder (DDMZ) Modulator. – URL: http://www.pdf-file.ic37.com ›pdf4/JDSU/21105245-001_.
8. Integrated-optical modulators. Technical information and instructions for use. [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.jenoptik.com>
9. Пономарев Р.С., Вобликов Е.Д. Некоторые вопросы работы интегрально-оптических модуляторов интенсивности // Вестник Пермского университета. Сер. Физика. – 2011. – Вып. 2 (17). – С. 65–68.

10. Photline Technologies (iXBlue) Амплитудные электрооптические модуляторы Маха–Цендера [Электронный ресурс]. – URL: http://www.sphotonics.ru>producer/photline_technologies.
11. MXER-LN series [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.lasercomponents.com>.
12. High-speed Polarization Controllers EOSPACE Advanced Products 2017 [Электронный ресурс]. – URL: <http://eospace.com/pdf/EOSPACEbriefProductInfo2017.pdf>.
13. Интегральная оптика и модуляторы для специальных применений [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.sphotonics.ru>.
14. SWT (Китай) – производитель LiNbO₃ модуляторов и InGaAs фотодиодов [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.swt-oc.com>.
15. MBC-AN series | Bias Controllers [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.qubig.com>.
16. MBC-DG series [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.qubig.com>.
17. MBX – Modulator Bias and Power Controller [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.azimp.ru>Thorlabs>Электрооптические модуляторы>39784>.
18. Analog Application using LiNbO₃ modulators and matching components [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.photonics.ixblue.com>
19. MIOC-1550-PG [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.optolab.com>.
20. Научно-производственная Компания «Оптолинк» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.optolink.ru>.
21. Dual Parallel Mach-Zehnder (DPMZ) Modulator [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.wircom.ua>content/1794/dpmzmoddsccae.pdf>
22. EOSPACE – Low-loss LiNbO₃ Products 2013 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.eospace.com>.
23. Modulator Bias Controller MBC-IQ-BT set-up with IQ modulator [Электронный ресурс]. – URL: http://www.hikari-trading.com>opt/photline/file/mbc_iq_bt.pdf.
24. MXIQ-LN-40 Низкие Потери Двойной Параллельный Модулятор Маха–Цандера [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.cybel-llc.com>.
25. Marcus Duelk, Peter Winzer DQPSK Format for Serial PHY // IEEE 802.3 High-Speed Study Group. – 2006. – November. – С. 13–16.

26. Шумов А.В., Нефедов С.И., Бикметов А.Р. Концепция построения радиолокационной станции на основе элементов радиофотоники // Наука и образование: электрон. журн. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – № 05. – С. 41–65.

27. Nagata H., Papasavvas N. Bias stability of OC 48 x-cut lithium-niobate optical modulators: Four years of biased aging test results // Technol. Lett. IEEE. – 2003. – Vol. 15 (1). – P. 42–44.

Получено 20.11.17