

Модуляционные методы формирования спектрально чистого двухканального полигармонического излучения с одинаковой разностной частотой и поляризационным мультиплексированием.

Постановка задачи

О.Г. Морозов, Г.И. Ильин, Г.А. Морозов, И.И. Нуреев, Л.М. Фасхутдинов

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ*

Аннотация: В статье с точки зрения определения требований к параметрам внешней амплитудно-фазовой модуляции лазерного излучения как ключевому процессу формирования радиочастотных сигналов в оптическом диапазоне для систем с поляризационным мультиплексированием полигармонических сигналов, обзорно рассмотрены основные схемы, характеристики, и направления развития генераторных узлов радиофотонных систем.

Ключевые слова: радиофотоника; модуляция лазерного излучения с подавлением несущей; оптическая генерация радиосигналов; генерация полигармонических оптических сигналов, радиочастотные составляющие, поляризационное мультиплексирование.

Введение

В ряде задач, решаемых с помощью лазерных волоконно-оптических телекоммуникационных (ВОТС) и сенсорных (ВОСС) систем, требуется генерация специальных форматов модуляции несущей или зондирование контролируемых сред или элементов с помощью лазерного излучения, содержащего одновременно две, три, четыре и т.д. частотные составляющие с изменяющейся разностной частотой, поляризационно мультиплексированные, как минимум, по двум ортогональным каналам. К системам, решающим такие задачи, относятся генераторы RZ и CSRZ форматов модуляции [1-2], несущих для QAM форматов в 100-400G и ROF линиях связи [3], полностью оптические фильтры микроволновых сигналов с мнимыми коэффициентами [4], оптические векторные анализаторы спектра [5], измерители магнитных полей [6], измерители мгновенной частоты [7-8] и т.д. Как правило, указанные системы обладают простыми симметричными оптическими схемами, возможностью, при необходимости, выполнения условий само-

гетеродинирования (неразнесенные в пространстве пучки), возможностью компенсации помех, одинаково воздействующих на частотные составляющие. При необходимости отдельного анализа информации частотных составляющих в системах могут быть применены различного рода временные, спектральные, поляризационные разделители, переключатели, фильтры и т.д.

Однако, используемые в них для формирования сигналообразующего и зондирующего излучения с требуемыми характеристиками устройства не обладают возможностью полного подавления несущей частоты или одной из боковых полос [5], что сказывается на погрешностях восстановления информационных сигналов в ВОТС, а также точности и диапазоне измерений в ВОСС. Для решения указанной задачи требуется установка фильтров, как правило, на волоконных брэгговских решетках [9], что усложняет конструкцию системы и увеличивают зависимость ее характеристик от влияния внешних физических полей, например, температуры.

Кроме указанных выше недостатков, существенной является невозможность создания устройств с одинаковой разностной частотой в поляризационно-мультиплексированных каналах и с частотой равной модулирующей [5], объясняемые методикой формирования последних в различных устройствах (фазовые, амплитудные, поляризационные электрооптические модуляторы [1-9]). Данный фактор сказывается на повышении сложности и фазовой нестабильности систем в части построения каналов гетеродинирования в ВОТС и каналов синхронизации или, например, синхронного детектирования в ВОСС. Следует также указать на применение специальных модуляторных схем, характерных при использовании поляризационных модуляторов (ПолМ) [10], которые сами по себе сложны и дорогостоящи по сравнению с модуляторами Маха-Цендера (ММЦ), но еще и требуют особых вариантов включения в интерферометри-

ческие устройства, например, для решения задач демультимплексирования поляризационных каналов [10].

Для устранения указанных недостатков предлагается решить задачу формирования перестраиваемых по разностной частоте полигармонических лазерных излучений с поляризационным мультимплексированием путем применения тандемной амплитудно-фазовой модуляции одночастотного лазерного излучения в стандартных телекоммуникационных электрооптических ММЦ на основе способа Ильина-Морозова [11-17]. При этом целевыми характеристиками будет получение одинаковой разностной частоты в обоих поляризационно-мультимплексированных каналах, равной модулирующей, а также максимально возможное и большее по сравнению с существующими подавление исходной несущей для излучения с четным числом составляющих.

Оценить реальность такой постановки задачи, можно лишь после анализа возможности получения симметричного двухчастотного излучения разной поляризации с помощью различных устройств формирования (УФ), анализа современных электрооптических модуляторов, используемых в ВОТС, а также методов определения возможности получения информации при зондировании симметричным двухчастотным излучением сред, элементов и волоконно-оптических датчиков (ВОД) в ВОСС. И для ВОТС, и для ВОСС планируется анализ генерируемых сигналов и обработки информационных сигналов по огибающей биений полигармонических, в частности, двухчастотных излучений. В первом случае это позволяет получить генерацию требуемых сигналов с минимальными фазовыми шумами, во втором – организовать перенос спектра, отраженного или обратно-рассеянного сигнала, в область с минимальным уровнем шумов фотоприемника. Для формирования сигналов в заданных областях спектра или проведения пространственно-разнесенных измерений возможно

использование двухчастотного сканирования [18] и двухчастотной ЛЧМ [19] соответственно.

1. Оценка возможности получения симметричного двухчастотного излучения в УФ

К настоящему времени разработано большое количество УФ, различных по принципу действия и конструкции [19-27]. Методы измерений, используемые в лазерных ВОСС, а также условия накладываемые необходимостью формирования симметричного двухчастотного излучения с поляризационным мультиплексированием в ВОТС, позволяют сформировать требования к данным устройствам.

К их числу, кроме указанных во введении, относятся: высокая стабильность и широкий диапазон разностных частот, высокий коэффициент преобразования частоты, высокая степень спектральной чистоты выходного излучения и стабильность спектральных характеристик при отклонении параметров преобразования от оптимальных, простота конструкции и эксплуатации. С учетом этих требований нами проведен сравнительный анализ основных характеристик УФ, часто используемых в формирователях сигналов и измерительных преобразователях с переносом спектра информационного сигнала. Для анализа были использованы материалы известных обзоров и некоторых специальных работ [28-37]. Результаты анализа представлены в табл. 1. Основываясь на результатах анализа можно сказать следующее. Использование двухволновых и двухмодовых лазеров оставляет открытой не только проблему поляризационного мультиплексирования и стабильности разностной частоты, но и затрудняет получение малых разносов частоты (диапазон ограничен снизу частотами межмодовых интервалов). В отличие от лазеров с помощью механических устройств преобразования возможно высокоэффективное и простое получение разностных частот в диапазоне до 100 кГц.

Таблица № 1

Характеристики УФ

Двух-частотные излучатели и их характеристики	Возможность перестройки разностной частоты	Диапазон разностных частот, МГц	Нестабильность разностной частоты	Равенство и стабильность амплитуд	Чистота выходного спектра	Возможность поляризационного мультиплексирования
Двухмодовый лазер	НСМ (*)	100	10^{-8}	+	+	-
Вращающаяся фазовая пластина	НСМ	$0...3 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	-	- (**)	-
Вращающаяся дифракционная решетка	НСМ	0...500	10^{-3}	-	- (**)	-
Пьезо-зеркало	+	0 ... 3	10^{-3}	-	- (****)	-
Лазер Зеемана	НСМ	$10^{-3}...100$	10^{-9}	+	+	+
Акустооптический модулятор	+	$10^{-2}...100$	10^{-6}	-	- (****)	-
Электрооптический модулятор фазовый	+	0...5	10^{-6}	-	±	+
Электрооптический модулятор поляризационный	+	0...20	10^{-6}	-	- (****)	+
Электрооптический модулятор амплитудный при работе в нулевой точке	+	0...1000	10^{-6}	+	+	+

* – необходимы специальные меры для обеспечения перестройки;

** – не удовлетворяет в связи с появлением паразитных составляющих из-за неточного соблюдения параметров;

**** – не удовлетворяет в связи с появлением значительных по уровню паразитных составляющих при отклонении параметров преобразования от оптимальных.

Однако на практике обычно требуются разностные частоты порядка единиц МГц. Основной недостаток механических устройств – нестабильность разностной частоты, обусловленная нестабильностью вращения приводящих устройств, неоднородностью рассеивающих поверхностей. Этот недостаток препятствует широкому использованию вращающейся дифракционной решетки, несмотря на то, что с ее помощью можно получить разности в широком, до 500 МГц, диапазоне.

В лазерной интерферометрии широкое применение получили лазеры на эффекте Зеемана, которые в соответствии с физикой работы позволяют получить двухчастотное излучение с поляризационным мультиплексированием. Следует отметить их преимущества: работа в широком диапазоне разностных частот 0,01 – 100 МГц с нестабильностью 10^{-8} . Отметим, что получение такого уровня нестабильности обеспечивается сложнейшими системами автоподстройки разностной частоты. Дополнительно, характерной чертой лазеров Зеемана является сильная S-образная зависимость разностной частоты излучения от величины напряженности прикладываемого магнитного поля и уровня мощности их накачки. Особо стоит вопрос формирования опорного канала для обработки измерительной информации.

Для дальнейших исследований выделим акусто- и электрооптические УФ. Их преимущества – однозначное соответствие значений разностной частоты и величины частоты управляющего поля, высокая стабильность разностной частоты, которая зависит от стабильности частоты управляющего поля, и формирование опорного канала на основе сигнала управляющего поля.

Акустооптические устройства менее стабильны и надежны в эксплуатации. Кроме того, порядки дифракции лазерного излучения формируются с отклонением от оптической оси. Поэтому основные

претенденты на использование в формирующих и измерительных системах с поляризационным мультиплексированием – электрооптические УФ. К ним относятся модуляторы, использующие нелинейные и поляризационные эффекты, эффекты взаимодействия оптических и электромагнитных полей с круговой поляризацией, эффекты фазовой модуляции лазерного излучения по линейным (пилообразным) законам.

Нестабильность спектрального состава на выходе УФ, вызванная отклонением параметров управляющих электрических напряжений от оптимальных, характерна и для электрооптических устройств: в большей степени поляризационных, в меньшей степени фазовых, в еще меньшей амплитудно-фазовых. Однако в первом и последнем случаях следует отметить возможность получения симметричного двухчастотного излучения. Следует только учесть, что равенство амплитуд составляющих стабильно соблюдается лишь при амплитудно-фазовом электрооптическом преобразовании.

Таким образом, анализ подтвердил перспективность получения симметричного двухчастотного излучения с поляризационным мультиплексированием с помощью электрооптических УФ. Использование амплитудно-фазовых электрооптических УФ будет эффективным при условии совершенствования методов и средств получения симметричного двухчастотного излучения с требуемыми параметрами, в том числе поляризационными.

Рассмотрим переход от амплитудно-модулированного сигнала со стопроцентной модуляцией к сигналу биений. Этот переход можно осуществить либо за счет подавления несущего колебания, либо за счет переключения фазы амплитудно-модулированного сигнала в момент достижения его огибающей нулевого значения. Спектры исходного квазигармонического колебания со структурой амплитудно-модулированного

сигнала (а) и спектры преобразованных колебаний со структурой сигнала биений, полученных по первому (б) и второму (в) вариантам, представлены на рис. 1.

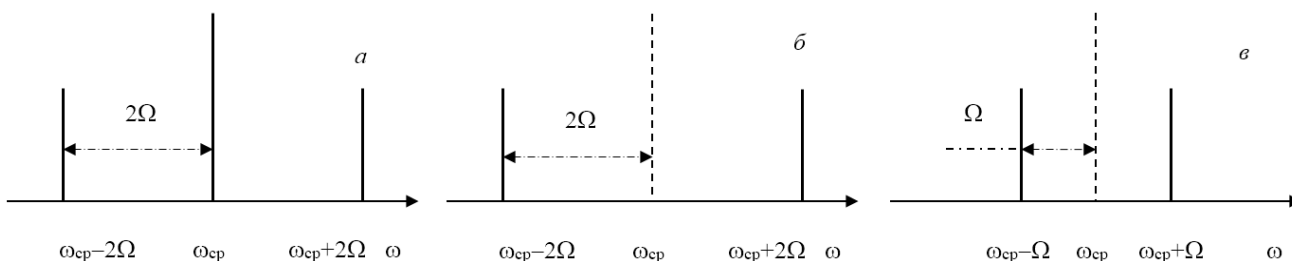


Рис. 1. – Спектр амплитудно-модулированного сигнала до (а) и после преобразования по первому (б) и второму (в) вариантам

В этих случаях полученные спектры существенно отличаются по разностным частотам 2Ω (рис. 1,б) и Ω (рис. 1,в) в зависимости от способа преобразования.

2. Формирователь сантиметрового диапазона

Рассмотрим первый вариант реализации. Формирователь сантиметрового диапазона был построен нами на принципах амплитудно-фазовой модуляции в классическом амплитудном электрооптическом модуляторе (АЭМ) на кристалле метаниобата лития LiNbO_3 , класс симметрии $3m$ [11-16]. Соединение АЭМ с ЛД и ФД осуществлялось с помощью волоконно-оптических пигтейлов. При работе генератора в «нулевой» точке модуляционной характеристики выходной спектр описывается выражением:

$$E_{\text{вых}} = -jE_0 e^{j\omega_0 t} \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(z) \sin(2k+1)\Omega t \right] \quad (1)$$

где ω_0 – угловая частота оптического излучения, а Ω – модулирующего; индекс j в данном выражении указывает на то, что выходное излучение

ортогонально вектору поляризации исходного излучения; $J_{2k+1}(z)$ – функция Бесселя $(2k+1)$ -го порядка.

При полуволновом напряжении $U_m = U_{\lambda/2}$ получим $z=\pi/2$, $J_1(z)=0,64$, $J_3(z)=0,06$. Одночастотный входной и двухчастотный выходной спектры излучения генератора, а также радиочастотный сигнал на выходе ФД показаны на рис. 2, *а-в* соответственно. Максимальный коэффициент преобразования (1) равен 0,64. При коэффициенте преобразования 0,58 коэффициент нелинейных искажений не превышает 1%. Есть еще два важных момента, которые стоит отметить, – это равенство амплитуд спектральных составляющих и противоположность их фаз, что важно, например, для генерации солитонов [1] и построения фотонных фильтров радиочастотных сигналов [34], вне зависимости от расположения рабочей точки, и простота перестройки частоты, что объясняется использованием одного модулирующего сигнала.

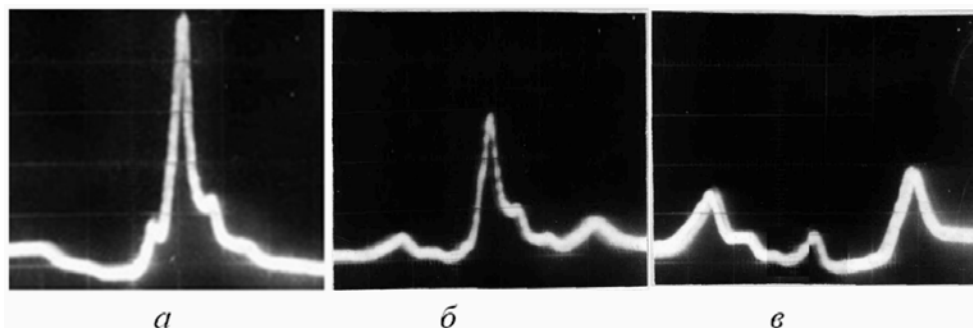


Рис. 2. – Спектр входного сигнала (*а*), и спектры выходного излучения АЭМ при работе на линейном участке (*б*) и в нулевой точке модуляционной характеристики (*в*)

Возможность возникновения четных составляющих в спектре выходного излучения показана в (2) и может быть полезна при генерации двух ортогональных по поляризации излучений:

$$e(t) = -j \frac{\sqrt{2}}{2} e^{j\omega_0 t} \left\{ \begin{aligned} & j \left[\sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{J}_0(z) + \sum_{k=1}^{\infty} 2\mathbf{J}_{2k}(z) \cos 2k\Omega t \right] \\ & + 2 \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{J}_{2k+1}(z) \sin(2k+1)\Omega t \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Теоретические результаты анализа спектра на выходе предлагаемого генератора приведены в табл. 2, и получены в предположении, что модулятор смещен при нулевом приложенном напряжении постоянного смещения равном 0, а поляризаторы либо ортогональны $\alpha = -\beta = 45^\circ$, либо параллельны $\alpha = \beta = 45^\circ$.

Таблица № 2

Выходные спектральные характеристики АЭМ

$\alpha, \beta, \Gamma_{\pm}$	Спектр излучения на выходе АЭМ
$\alpha = 45^\circ, \beta = -45^\circ, \Gamma_{\pm} = 0$	$E_{\text{вых}} = -jEe^{j\omega_0 t} \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{J}_{2k+1}(z) \sin(2k+1)\Omega t \right]$.
$\alpha = 45^\circ, \beta = 45^\circ, \Gamma_{\pm} = 0$	$E_{\text{вых}}(t) = Ee^{j\omega_0 t} \left\{ \mathbf{J}_0(z) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \mathbf{J}_{2k}(z) \cos 2k\Omega t \right\}$.

С выхода АЭМ излучение поступает на поляризационный светоделитель, у которого одна из главных осей ориентирована на угол 45° к модулятору. На двух выходах поляризационного светоделителя получим два оптических сигнала по двум главным осям, причем один сигнал состоит из всех оптических частот четного порядка, а другой из всех оптических частот нечетного, что позволит получить излучения разных поляризаций в диапазоне 0,3 – 1 ГГц, определяемом полосой пропускания АЭМ [15]. При этом четные гармоники и несущую можно преобразовать в двухчастотное излучение по второму варианту преобразования, описанному в разд. 4.

3. Зависимость спектрального состава излучения АЭМ при отклонении от оптимальных параметров преобразования частоты

В п. 2 показано, что АЭМ со скрещенными поляризаторами представляет собой требуемое нам УФ – устройство преобразования одночастотного когерентного излучения в симметричное двухчастотное. Как известно, основные критерии для выбора УФ: диапазон разностных частот и их стабильность, степень спектральной чистоты – наличие паразитных составляющих в выходном излучении и их уровень, зависимость спектрального состава на выходе УФ при отклонении параметров преобразования от оптимальных, а также конструктивная простота и эксплуатационная надежность. Оценим по указанным критериям выбранные АЭМ, реализующий амплитудно-фазовый способ преобразования частоты, и покажем области применения реализованного УФ.

Проанализируем модуляционную характеристику АЭМ и определим основные причины погрешностей преобразования: положение рабочей точки, отклонение величины напряжения управляющего поля и разъюстировка поляризаторов от ортогонального положения.

Когда амплитуда полезных составляющих максимальна (частота $\omega_0 \pm \Omega$, $E_1/E_0=0,57$, $U_m=U_{\lambda/2}$), амплитуда нежелательных составляющих также максимальна (частота $\omega_0 \pm 3\Omega$, $E_3=0,08E_0$). Амплитуды полезных и паразитных составляющих уменьшаются при уменьшении U_m , что связано с уменьшением вкладываемой в УФ энергии управляющего поля. При уменьшении $U_m/U_{\lambda/2}$ на 30% амплитуда полезной составляющей уменьшается на 18%. При неточной юстировке поляризаторов возможно проникновение четных составляющих в двухчастотное излучение. Обе указанные причины появления паразитных составляющих легко устранимы при качественной сборке и регулировке схемы формирователя.

Для оценки влияния изменения положения рабочей точки Γ_{\pm} использовалась формула (2). Результаты расчетов в виде зависимостей $|E_n/E_0| = f(\Gamma_{\pm})$ при $U_m = U_{\lambda/2}/2$ и изменении Γ_{\pm} от 0 до $\pi/2$ представлены на рис. 3.

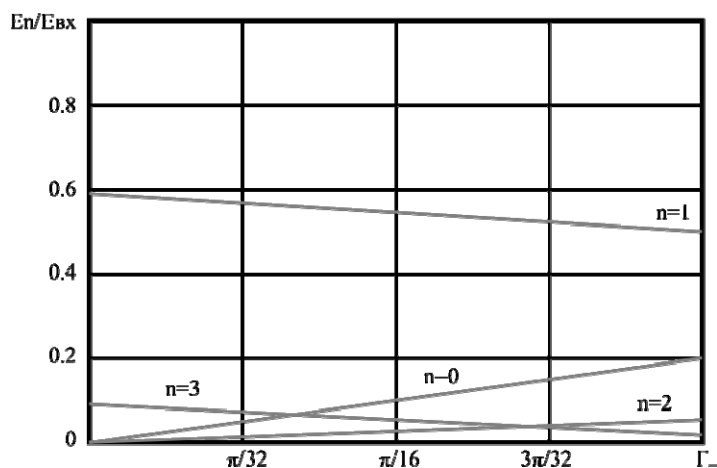


Рис. 3. – Зависимость относительных амплитуд спектральных составляющих от изменения положения рабочей точки Γ_{\pm}

Они дают полное представление о качественном и количественном составе спектра выходного излучения АЭМ. Наибольшее влияние на спектральный состав излучения оказывает отклонение положения рабочей точки от оптимального. Уход положения рабочей точки составляет 0,02 В при изменении температуры УФ на 1°С. Вызванные изменения выражаются в уменьшении амплитуд полезных составляющих на 0,5% и увеличении амплитуд паразитных составляющих на 1%.

Таким образом, были определены основные причины, приводящие к ухудшению характеристик УФ, в том числе изменению амплитуды полезных и паразитных спектральных составляющих выходного излучения, а также количеству последних. Особо необходимо стабилизировать положение рабочей точки УФ, которое определяется его температурой, ортогональностью поляризаторов и их положением относительно поляризации лазера. Для компенсации изменений положения рабочей точки

используется система слежения с приложением к электрооптическому элементу УФ управляющего напряжения.

Сравнение предложенного нами УФ с известными схемами показало, что может быть достигнута более высокая стабильность спектрального состава излучения на выходе АЭМ с учетом отклонения параметров преобразования от оптимальных в заданном диапазоне. Дополнительно подтверждена более высокая степень спектральной чистоты выходного излучения в указанном диапазоне изменений+.

4. Формирователь миллиметрового диапазона на двухпортовом ММЦ

Вторая версия первого варианта получения формирователя двухчастотного излучения была смоделирована на базе двухпортового (ДП) ММЦ (рис. 4) [35]. При моделировании радиочастотный сигнал с частотой 10 ГГц подавался на оба порта ДПММЦ. Напряжение смещения изменяет фазовую задержку между интерферирующими оптическими волнами на выходе ДПММЦ и таким образом меняет интенсивность выходного сигнала. Максимум передаточной функции соответствует случаю, когда разность фаз кратна 2π радиан (конструктивная интерференция), а минимум пропускания имеет место, когда разность фаз кратна π радиан (деструктивная интерференция).

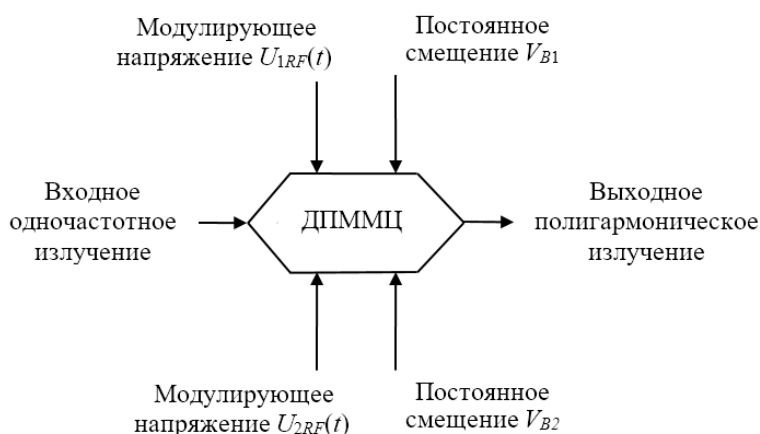


Рис. 4. – Схема устройства формирования симметричного полигармонического излучения на базе ДПММЦ

Полуволновое напряжение ДПММЦ U_{π} определяется как разность напряжений смещений, соответствующих максимуму и минимуму пропускания на модуляционной характеристике.

В работе [10] было показано, что симметричное двухчастотное излучение с подавленной несущей было получено при следующих условиях: разность в прикладываемых напряжениях смещения должна соответствовать полуволновому напряжению $\Delta V_B = V_{B1} - V_{B2} = U_{\pi}$, а прикладываемые модулирующие напряжения должны быть одинаковы по амплитуде, но противоположны по знаку $U_{1RF}(t) = -U_{2RF}(t)$, что позволит устранить фазовый чирп выходного сигнала.

Тогда спектр выходного сигнала будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 E_{out}(t) &= -2E_0 \sin(\omega_0 t) \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{J}_{2k+1} \left(\frac{\pi}{2} \right) \sin((2k+1)\omega_{RF} t) = \\
 &= 2E_0 \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{J}_{2k+1} \left(\frac{\pi}{2} \right) \left[\cos((\omega_0 + (2k+1)\omega_{RF})t) \right. \\
 &\quad \left. - \cos((\omega_0 - (2k+1)\omega_{RF})t) \right] \approx \\
 &\approx E_0 \mathbf{J}_1 \left(\frac{\pi}{2} \right) \left[\cos((\omega_0 + \omega_{RF})t) - \cos((\omega_0 - \omega_{RF})t) \right]
 \end{aligned} \tag{3}$$

Спектр входного одночастотного и выходного двухчастотного излучений представлены на рис. 5, а и рис. 5, б соответственно.

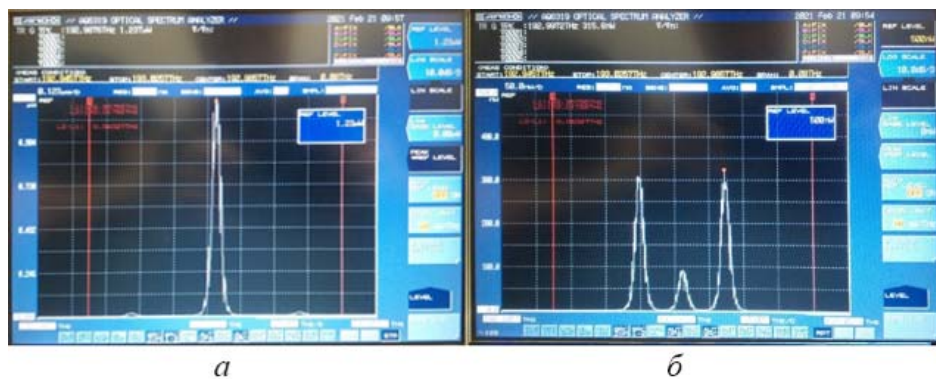


Рис. 5. – Спектры лазерного излучения на входе (а) и на выходе (б) ДПММЦ

При экспериментальной реализации в диапазоне 1550 нм при частоте модуляции $\omega_{RF} = 20$ ГГц, разнос между компонентами двухчастотного сигнала составил 40 ГГц, подавление несущей и паразитных компонент спектра составило 20 дБ, что в принципе не достаточно для формирования несущей радиодиапазона с требуемым уровнем фазовых шумов.

Для того, чтобы на выходе ММЦ получить поляризационное мультиплексирование необходимо использование специальной конфигурации модулятора – без выходного поляризатора. При этом, для того чтобы задать режим работы в максимальной точке для медленной оси необходимо ввести разность фаз между ортогональными поляризациями в одном из плеч модулятора. Этого можно добиться за счет введения волновой пластины в плечо кристалла интегральной схемы.

5. Формирователь миллиметрового излучения на основе поляризационного модулятора ПолМ

Поляризационный модулятор (ПолМ) представляет собой специальный фазовый модулятор, который поддерживает обе моды ТМ и ТЕ, обеспечивая модуляцию фазы в каждой из них, но с противоположным знаком. Такая модуляция достигается при настройке контроллером поляризации вектора поляризации исходного излучения таким образом, чтобы его положение составляло 45° с одной из принципиальных осей ПолМ.

Нормированное оптическое поле на выходе ПолМ может быть описано следующим образом:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \propto \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \exp(j\omega_0 t + j\beta_1 \cos \omega_{RF} t) \\ \exp(j\omega_0 t - j\beta_1 \cos \omega_{RF} t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

где β_1 – индекс фазовой модуляции в ПолМ, который определяется как $\pi U_p / U_\pi$ при соответствующих значениях амплитуды модулирующего напряжения U_p и полуволнового напряжения U_π .

ПолМ изготавливается по технологии *GaAs*, обладает коэффициентом контрастности 20, вносимыми оптическими потерями 3,5 дБ и полуволновым напряжением до 3,5 В в диапазоне частот от 40 до 80 ГГц. При использовании модулятора указанного класса достаточно просто реализуются все виды модуляции, включая амплитудно-фазовую, полученную нами на кристаллах *LiNbO₃* и представленную в работах [9-10, 15-17].

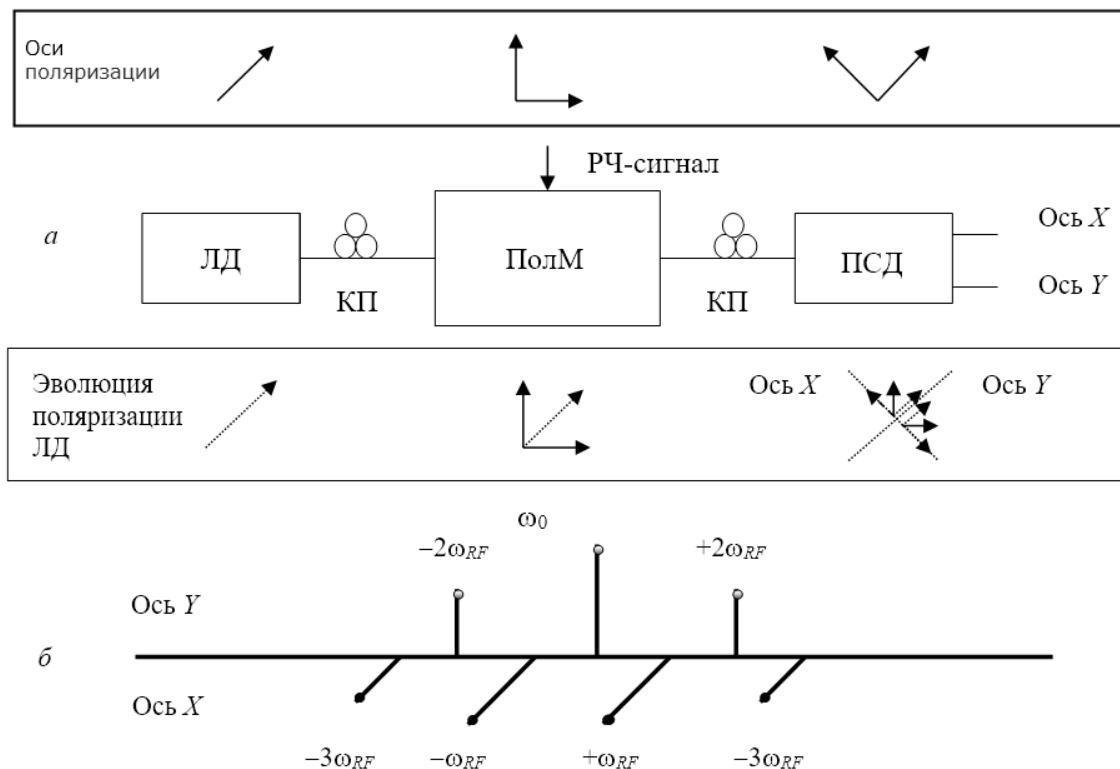


Рис. 6. – Поляризационный модулятор: структурная схема (а) с указанием осей и эволюции поляризаций ЛД, ПолМ и ПСД (поляризационный

светоделитель, призма Валлостона); выходной спектр излучения (δ)
по осям ПСД

Контроллер поляризации на выходе ПолМ позволяет либо объединить обе составляющие, либо выделить каждую из них. Использование ПолМ совместно с контроллером поляризации и поляризатором с высокой экстинкцией позволяет добиться результатов сходных с использованием модулятора Маха-Цендера. Рабочая точка в данном случае задается контроллером поляризации, за счет внесения дополнительной разности фаз в выходной сигнал модулятора.

От использования поляризационного контроллера в данной схеме можно отказаться. В этом случае рабочая точка будет задаваться постоянным смещением, подмешиваемым к модулирующему сигналу, аналогично АЭМ. Постоянный сдвиг фаз будет определяться как множитель полуволнового напряжения.

Распространение ПолМ ограничивается сложностью изготовления, а также необходимостью применения специальных интерферометрических схем включения.

6. Тандемный формирователь миллиметрового излучения на стандартных ММЦ

Рассмотрим второй вариант реализации. Формирование двухчастотного излучения можно осуществить за счет переключения фазы амплитудно-модулированного сигнала в момент достижения его огибающей нулевого значения.

Простейшим колебанием для амплитудной модуляции, удовлетворяющим требованиям двухчастотности, является колебание вида $S_1(t) = S_1 \cos(2\Omega t + \pi)$, где S_1 – его постоянная амплитуда, а π – начальная фаза. При этом фазу несущего колебания ω_0 будем коммутировать на π при

прохождении огибающей амплитудно-модулированного колебания минимума. В случае амплитудной модуляции колебанием $S_1(t)$ коммутируемой несущей получим результирующее колебание, имеющее спектр следующего вида:

$$e(t) = \frac{2E_0}{\pi} \sum_n \left\{ \left[\frac{1}{n} - \frac{m}{2} \left(\frac{1}{n-2} + \frac{1}{n+2} \right) \right] * [\cos(\omega_0 + n\Omega)t - \cos(\omega_0 - n\Omega)t] \right\}. \quad (5)$$

где m – коэффициент амплитудной модуляции.

Из анализа (4) видно, что первое слагаемое в больших квадратных скобках определяет спектр коэффициентов ряда Фурье коммутируемой несущей, а второе и третье описывают подавляющее воздействие на его составляющие модулирующим колебанием. Степень подавления зависит от коэффициента модуляции m . Приняв $E_3 = 0$, получим, что оптимальный коэффициент модуляции $m_{opt} = 5/9$, при этом результирующее колебание практически двухчастотно ($E_1 = 0,76E_0$), так как амплитуда спектральных составляющих $E_n \leq E_1/15$ для $n \geq 5$. При изменении коэффициента модуляции в пределах $(0,85 - 1,15)$ m_{opt} коэффициент нелинейных искажений выходного колебания не будет превышать 1%.

Полного подавления боковых составляющих с $n \geq 3$ можно добиться при использовании для амплитудной модуляции колебания вида $S_2(t) = S_0 |\sin\Omega t|$. Тогда результирующее колебание будет иметь следующий спектр:

$$e(t) = \frac{2E_0}{\pi} (1-b) \sum_n \frac{1}{n} \{ \cos(\omega_0 + n\Omega)t - \cos(\omega_0 - n\Omega)t \} + \frac{\pi E_0 b}{4} \{ \cos(\omega_0 + \Omega)t - \cos(\omega_0 - \Omega)t \}, \quad (6)$$

где b – коэффициент амплитудной модуляции.

Амплитуда спектральных составляющих будет определяться коэффициентами ряда Фурье и для $n=1$ $E_1 = [2E_0/\pi][1-b] + [\pi E_0 b/4]$, а для $n \geq 3$ E_n

$=[2E_0/\pi n][1-b]$. При $b_{opt}=1$ спектр содержит две полезных составляющих на частотах $\omega_0+\Omega$ и $\omega_0-\Omega$, паразитные составляющие полностью подавлены. При изменении коэффициента модуляции в пределах $(0,7-1)b_{opt}$ коэффициент нелинейных искажений выходного колебания не будет превышать 1%.

Таким образом, двухчастотное излучение может быть получено с помощью тандемной схемы: амплитудного модулятора, работающего на линейном участке рабочей характеристики, и фазового (рис. 7). При этом для управления фазовым модулятором используется блок преобразования синусоидального сигнала с частотой Ω в меандр с частотой $\Omega/2$ для фазовой коммутации с соответствующими амплитудами управляющих напряжений.

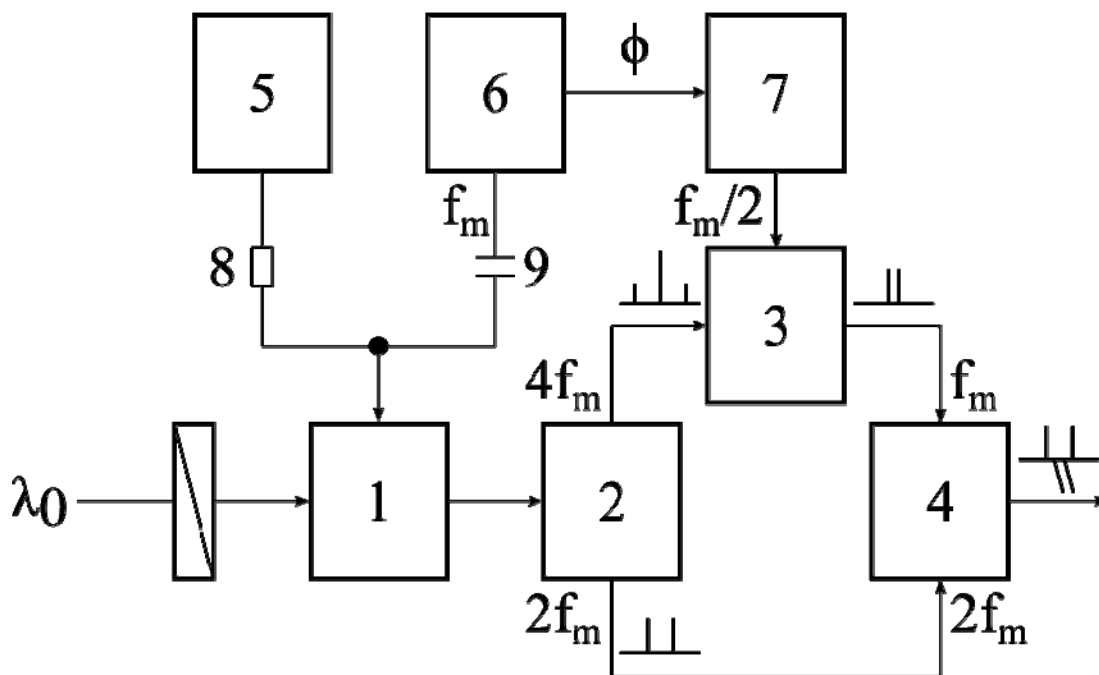


Рис. 7. – Формирователь двухчастотного излучения с полностью подавленной несущей: 1 – амплитудный электрооптический модулятор; 2, 4 – поляризационный делитель; 3 – фазовый электрооптический модулятор; 5 – источник постоянного смещения; 6 – генератор модулирующего напряжения; 7 – схема управления фазовым модулятором; 8,9 – развязывающие элементы

Спектр излучения для двух составляющих на выходе модуляторов в данном случае описывается выражением:

$$E_{\text{АФМ}}(t) = 0,49E_0 \{ \sin(\omega + \Omega/2)t - \sin(\omega - \Omega/2)t \} + \quad (7) \\ + 0,007E_0 \{ \sin(\omega + 3\Omega/2)t - \sin(\omega - 3\Omega/2)t \} + \dots$$

Как видно из (6) разностная частота между составляющими двухчастотного излучения Ω равна частоте модулирующего сигнала. Составляющие высших гармоник можно не учитывать в силу малости их амплитуд. Получено сужение разностной частоты в два раза по сравнению с классическими схемами ее удвоения, применяемыми в практике известных радиодетекторных систем, например, при использовании одного амплитудного модулятора, работающего для подавления несущей в «нулевой» точке модуляционной характеристики, как указывалось в (1) и (2).

В зависимости от круга решаемых задач, возможны несколько вариантов реализации схемы. Представленный на рис. 7 вариант позволяет однозначно решить проблему адресации ортогональных поляризаций по частоте биений, без применения схем разделения поляризации на приемной стороне.

Возможна схема с последовательным включением амплитудного и фазового модулятора без разделения каналов в поляризационном делителе. В данном случае переключение поляризации осуществляется либо с помощью перестройки выходного анализатора, либо коммутацией постоянного смещения в определенные моменты времени. Стоит заметить, что в этом варианте фазовой модуляции подвергаются обе составляющие, а также происходит временное разделение поляризаций, зависящее от времени перестройки анализатора/переключения напряжения смещения.

Заключение

Обзорные исследования, представленные в настоящей статье, позволили определить основные требования, предъявляемые к современным системам с поляризационным мультиплексированием. Развитие данных систем сдерживается возможностью полного подавления несущей частоты

или одной из боковых полос, что сказывается на погрешностях восстановления информационных сигналов в ВОТС, а также точности и диапазоне измерений в ВОСС.

Указанные проблемы могут быть решены построением радиотонных систем с поляризационным мультиплексированием на основе одночастотных непрерывных лазеров и амплитудно-фазовых электрооптических модуляторов (возможно использование поляризационных модуляторов).

В основе решения поставленных задач лежит использование уникального метода [11-14], который получил название метода Ильина-Морозова, предложенного авторами в 1983 году и основанного на модуляции амплитуды и манипуляции фазы исходного одночастотного излучения для синтеза симметричных двухчастотных и полигармонических излучений. Выходное полигармоническое излучение при реализации метода Ильина-Морозова содержит в своей структуре симметричные относительно подавленной исходной составляющие, равной амплитуды и альтернативной фазы с разностной частотой, равной частоте модулирующего радиосигнала или ее удвоенному значению, и характеризуется высокой степенью спектральной чистоты при отклонениях параметров преобразования от оптимальных.

В настоящей статье была показана возможность генерации полигармонических излучений с радиочастотными компонентами по двум ортогональным поляризациям.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части Государственного задания 8.6872.2017/8.9.

Литература

1. Талипов А.А. и др. Метод формирования двухчастотного излучения для синтеза солитонов и применения спектрально-эффективной модуляции



RZ и CSRZ форматов в оптических сетях доступа // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2012. № 2(16). С. 3-12.

2. Zou X., Yao J. Repetition-rate-tunable return-to-zero and carrier-suppressed return-to-zero optical pulse train generation using a polarization modulator // Opt. Lett. 2009. Vol. 34. No 3. pp. 313-315.

3. Трещиков В.Н., Наний О.Е. Новое поколение DWDM-систем связи // Фотон-Экспресс. 2014. № 4(116). С. 18-23.

4. Chen, X., Deng Z., Yao J.P. Ultranarrow dual-transmission-band fiber Bragg grating filter and its application in a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber ring laser // Opt. Lett. 2005. Vol. 30. No 16. pp. 2068-2070.

5. Zhenzhou Tang, Shilong Pan, and Jianping Yao. A high resolution optical vector network analyzer based on a wideband and wavelength-tunable optical single-sideband modulator // Opt. Express. 2012. No. 20. pp. 6555-6560.

6. Hui Peng, et al. Measurement for Magnetic Field with Fiber Grating // Acta Optica Sinica. 2008. Vol. 28. No 9. pp. 1717-1721.

7. Морозов О.Г. и др. Измерение мгновенной частоты с помощью двухчастотного зондирования // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 4. С. 146-149.

8. Морозов О.Г. и др. Измерение мгновенной частоты СВЧ-радиосигналов в оптическом диапазоне на основе преобразования «частота-амплитуда» в волоконной решётке Брэгга с фазовым сдвигом // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 3. С. 30-41.

9. Морозов О.Г. и др. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решёток Брэгга с фазовым сдвигом // Вестник Марийского государственного

технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2010. № 3. С. 3-13.

10. Морозов О.Г. и др. Радиотехнические системы двухчастотного симметричного зондирования контура усиления Манделштама-Бриллюэна в одномодовых оптических волокнах // Прикладная фотоника. 2015. Т. 2. № 3. С. 223-245.

11. Пат. А 1338647 SU МПК4 G02F 1/03. Способ преобразования одночастотного когерентного излучения в двухчастотное / Ильин Г.И., Морозов О.Г.; заявитель КАИ им. А.Н. Туполева; заявл. 13.04.83; опубл. 20.07.2004. – Бюлл. № 20.

12. Пат. А1 1463010 SU МПК4 G02F 1/03. Двухчастотный лазерный излучатель / Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е., Терновсков В.Т.; заявитель КАИ им. А.Н. Туполева; заявл. 29.04.85; опубл. 20.07.2004. – Бюлл. № 20.

13. Пат. А1 1466494 SU МПК4 G02F 1/03. Двухчастотный лазерный излучатель / Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е.; заявитель КАИ им. А.Н. Туполева; заявл. 29.04.85; опубл. 20.07.2004. – Бюлл. № 20.

14. Пат. А1 1477130 SU МПК4 G02F 1/03. Двухчастотный лазерный излучатель / Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е.; заявитель КАИ им. А.Н. Туполева; заявл. 03.03.86; опубл. 20.07.2004. – Бюлл. № 20.

15. Морозов О.Г. Амплитудно-фазовое преобразование частоты в системах временной и частотной рефлектометрии волоконно-оптических информационных и измерительных сетей // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2004. Т. 7. № 1. С. 63-71.

16. Морозов О.Г. и др. Амплитудно-фазовые методы формирования зондирующих излучений для систем анализа волоконно-оптических структур // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 3. С. 119-124.



17. Нуреев И.И. Радиофотонные амплитудно-фазовые методы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // Инженерный вестник Дона. 2016. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581.

18. Насыбуллин А.Р. и др. Радиофотонный синтез сложных радиосигналов с линейной частотной модуляцией / // Научные технологии: естественные и технические науки. 2015. № 12. С. 35-39.

19. Морозов О.Г., Талипов А.А. Определение характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна с помощью двухчастотного сканирования // Перспективы науки. 2013. № 10(49). С. 161-164.

20. Seeds A. Microwave photonics // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2002. Vol. 50. No 3. pp. 877-887.

21. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds // Nat. Photonics. 2007. Vol. 1. No 6. pp. 319-330.

22. Yao J. Microwave photonics // J. Lightwave Technol. 2009. Vol. 27. No 3. pp. 314-335.

23. Berceci T., Herczfeld P.R. Microwave photonics – a historical perspective // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2010. Vol. 58. No 11. pp. 2992-3000.

24. Yao J.P. A Tutorial on Microwave Photonics // IEEE Photon. Soc. Newsletter. 2012. Vol. 26. No. 2. pp. 4–12.

25. Capmany J., et al. Microwave photonic signal processing // J. Lightwave Technol. 2013. Vol. 31. No 4. pp. 571-586.

26. Minasian R.A., Chan E.H.W., Yi X. Microwave photonic signal processing // Opt. Express. 2013. Vol. 21. No 19. pp. 22918-22936.

27. Xinhong Wang, et al. Optical generation of microwave/millimeter-wave signals using two-section gain-coupled DFB lasers // IEEE Photonics Technology Letters. 1999. Vol. 10. No. 11. pp. 1292-1294.

28. Herczfeld P.R., et al. Indirect subharmonic optical injection locking of a millimeter-wave IMPATT oscillator // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1986. Vol. 34. No. 12. pp. 1371-1376.

29. Лазерные измерительные системы / А.С. Батраков, М.М. Бутусов, Г.П. Гречка и др.; Под ред. Д.П. Лукьянова. М.: Радио и связь, 1981. 456 с.

30. Застрогин Ю.Ф. Контроль параметров движения с использованием лазеров. Методы и средства. М.: Машиностроение, 1981. 176 с.

31. Воробьев В.В. Измерители перемещений на основе интерферометров с электро-оптическим модулятором // Автометрия. 1977. № 2. С. 127-130.

32. Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. Исследование ЛЧМ-лидара с преобразованием частоты. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 2. С. 219-224.

33. Катыс Г.П., Кравцов Н.В., Чирков Л.Е., Коновалов С.И. Модуляция и отклонение оптического излучения. М.: Наука. 1967. 176 с.

34. Телешевский В.И. Оптоэлектронные методы модуляции в фотоэлектрических системах измерения линейных и угловых величин // Измерительная техника. 1973. № 3. С. 30-34.

35. Садеев Т.С., Морозов О.Г. Спектральные характеристики фотонных фильтров микроволновых сигналов на основе амплитудных электрооптических модуляторов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2010. № 3. С. 22-30.

36. Мисбахов Р.Ш. и др. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей // Инженерный вестник Дона. 2017. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343.

37. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. Синтез двухчастотного излучения и его применение в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 3. С. 84-91.

References

1. Talipov A.A., et al. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: Radiotekhnicheskie i infokommunikacionnye sistemy. 2012. № 2(16). P. 3-12.

2. Zou X., Yao J. Opt. Lett. 2009. Vol. 34. No 3. pp. 313-315.

3. Treshtchikov V.N., Nanij O.E. Foton-Jekspress. 2014. № 4(116). P. 18-23.

4. Chen, X., Deng Z., Yao J.P. Opt. Lett. 2005. Vol. 30. No 16. pp. 2068-2070.

5. Zhenzhou Tang, Shilong Pan, and Jianping Yao. Opt. Express. 2012. No. 20. pp. 6555-6560.

6. Hui Peng, et al. Acta Optica Sinica. 2008. Vol. 28. No 9. pp. 1717-1721.

7. Morozov O.G., et al. Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. 2012. № 4. pp. 146-149.

8. Morozov O.G., et al. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikacionnye sistemy. 2013. № 3. pp. 30-41.

9. Morozov O.G., et al. Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikacionnye sistemy. 2010. № 3. pp. 3-13.

10. Morozov O.G., et al. Prikladnaja fotonika. 2015. Т. 2, № 3. P. 223-245.

11. Il'in G.I., Morozov O.G. Pat. A 1338647 SU MPK4 G02F 1/03; заявитель KAI im. A.N. Tupoleva; zajavl. 13.04.83; opubl. 20.07.2004. Bjull. № 20.

12. Il'in G.I., et al. Pat. A1 1463010 SU MPK4 G02F 1/03; заявитель KAI im. A.N. Tupoleva; zajavl. 29.04.85; opubl. 20.07.2004. Bjull. № 20.



13. Il'in G.I., Morozov O.G., Pol'skij Ju.E. Pat. A1 1466494 SU MPK4 G02F 1/03; zajavi-tel' KAI im. A.N. Tupoleva; zajavl. 29.04.85; opubl. 20.07.2004. – Bjull. № 20.

14. Il'in G.I., Morozov O.G., Pol'skij Ju.E. Pat. A1 1477130 SU MPK4 G02F 1/03; zajavi-tel' KAI im. A.N. Tupoleva; zajavl. 03.03.86; opubl. 20.07.2004. – Bjull. № 20.

15. Morozov O.G. Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy. 2004. T. 7. № 1. pp. 63-71.

16. Morozov O.G., et al. Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy. 2007. T. 10. № 3. pp. 119-124.

17. Nureev I.I. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581.

18. Nasybullin A.R., et al. Nauchnye tehnologii: estestvennyye i tehnicheckie nauki. 2015. № 12. pp. 35-39.

19. Morozov O.G., Talipov A.A. Perspektivy nauki. 2013. № 10(49). P. 161-164.

20. Seeds A. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2002. Vol. 50. No 3. pp. 877-887.

21. Capmany J., Novak D. Nat. Photonics. 2007. Vol. 1. No 6. pp. 319-330.

22. Yao J. J. Lightwave Technol. 2009. Vol. 27. No 3. pp. 314-335.

23. Berceli T., Herczfeld P.R. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2010. Vol. 58. No 11. pp. 2992-3000.

24. Yao J.P. IEEE Photon. Soc. Newsletter. 2012. Vol. 26. No. 2. pp. 4–12.

25. Capmany J., et al. J. Lightwave Technol. 2013. Vol. 31. No 4. pp. 571-586.

26. Minasian R.A., Chan E.H.W., Yi X. Opt. Express. 2013. Vol. 21. No 19. pp. 22918-22936.

27. Xinhong Wang, et al. IEEE Photonics Technology Letters. 1999. Vol. 10. No. 11. pp. 1292-1294.



28. Herczfeld P.R., et al. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1986. Vol. 34. No. 12. pp. 1371-1376.
29. Lazernye izmeritel'nye sistemy [Laser measuring systems] / A.S. Batrakov, M.M. Butusov, G.P. Grechka, et al.; Ed. by D.P. Luk'janov. M.: Radio i svjaz', 1981. 456 p.
30. Zastrogin Ju.F. Kontrol' parametrov dvizhenija s ispol'zovaniem lazerov. Metody i sredstva [Monitoring of movement parameters with laser using. Methods and means]. M.: Mashinostroenie, 1981. 176 p.
31. Vorob'ev V.V. Avtometrija. 1977. № 2. P. 127-130.
32. Il'in G.I., Morozov O.G., Pol'skij Yu.E. Optika atmosfery i okeana. 1997. V. 10. № 2. P. 219-224.
33. Katys G.P., Kravcov N.V., Chirkov L.E., Konovalov S.I. Moduljacija i otklonenie opticheskogo izlucheniya [Modulation and deflection of optical radiation]. M.: Nauka. 1967. 176 p.
34. Teleshevskij V.I. Izmeritel'naja tehnika. 1973. № 3. P. 30-34.
35. Sadeev T.S., Morozov O.G. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologi-cheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikacionnye sistemy. 2010. № 3. P. 22-30.
36. Misbahov R.Sh., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343.
37. Morozov O.G., Ajbatov D.L., Sadeev T.S. Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy. 2010. T. 13. № 3. P. 84-91.