

Формирование и усиление сигналов

DOI 10.24412/2221-2574-2021-444-39-48

УДК 535.4(076.5); 621.382; 621.373.1

ФОТОННАЯ СИСТЕМА ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЪЁМНОЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ГОЛОГРАММЫ

Прыгунов Александр Германович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Радиоэлектроника» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет».

E-mail: agprygunov@mail.ru

Тузко Ярослав Николаевич

студент кафедры «Аппаратно-программные комплексы» факультета «Магистратура» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет».

E-mail: travel-ros-st@mail.ru

Адрес: 344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1.

Аннотация: Рассмотрена задача построения фотонной системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с использованием объёмной отражательной голограммы. Обоснована актуальность решения данной проблемы. Особую роль в работе устройств для формирования высокостабильных электрических колебаний играет система ФАПЧ, обеспечивающая высокую точность и стабильность генерируемых колебаний. К сожалению, современные системы ФАПЧ имеют ограниченные частотные диапазоны полос захвата и удержания, и существуют ограничения на производительность и стабильность этих систем, а также на амплитуды стабилизированных колебаний. Реализация возможностей фотоники при построении современных систем ФАПЧ является актуальным направлением для улучшения их технических характеристик. Наивысшими техническими характеристиками обладают фотонные устройства, в которых используются голографические элементы конструкции. В статье представлен и описан вариант структурной схемы фотонной системы ФАПЧ с объёмной отражающей голограммой в ее конструкции. Разработана и исследована математическая модель процесса формирования интерферограммы в этой системе. Разность фаз можно измерить, анализируя параметры интерферограммы. В работе определяется чувствительность параметров этой интерферограммы к пространственному положению фазового центра источника светового потока со сферическим волновым фронтом, модулированного электрическим сигналом, пропорциональным выходному сигналу регулируемого генератора системы ФАПЧ. Сделан обоснованный вывод о возможности практической реализации голографической фотонной системы ФАПЧ с улучшенными техническими характеристиками.

Ключевые слова: фотоника, фазовая автоподстройка частоты, объёмная отражательная голограмма, оптическое излучение, модуляция, фаза светового потока, фазовый детектор, интерферограмма, математическая модель, чувствительность.

Актуальность задачи

Перспективным направлением в построении оборудования телекоммуникационных систем является всё более широкое использование фотоники [1]. В настоящее время с использованием фотоники разработаны различные типы сетей, систем и устройств телекоммуникаций [1–3]: распределённые сети сотовой и спутниковой связи, антенные системы, системы обра-

ботки и визуализации сигналов, волоконно-оптические системы передачи, гибридные радиофотонные системы (hybrid fiber radiosystem — HFR), которые становятся ключевой технологией для обеспечения надёжного функционирования сложных беспроводных сетей будущего поколения (intelligent optical network — ION). Использование фотоники позволяет расширить функциональные возможности

устройств телекоммуникационной аппаратуры. По сравнению с электронными аналогами телекоммуникационные устройства с использованием фотоники имеют более высокое быстродействие, больший динамический диапазон, как по частоте, так и по уровню информационного сигнала, обеспечивают снижение энергопотребления и уровня шумов, возможность вариации параметров и характеристик сигналов в широком диапазоне значений [1–3]. Во втором приоритетном направлении развития фотоники в Российской Федерации, определённом Межведомственной программой исследований и разработок в области фотоники на 2017–2020 годы, представлены основные направления построения телекоммуникационных систем и устройств с использованием фотоники [1].

Для работы современной электронной аппаратуры, обеспечивающей передачу приём и обработку информационных сообщений, независимо от её функционального назначения, необходимо иметь генераторное оборудование, формирующее высокостабильные электрические колебания для функционирования этой аппаратуры. Технические характеристики любой телекоммуникационной аппаратуры решающим образом зависят от стабильности частот выходных колебаний её генераторного оборудования [3]. В генераторном оборудовании современных телекоммуникационных систем задача формирования высокостабильных электрических колебаний решается путём комплексного использования систем частотной и фазовой автоподстройки частоты (ЧАПЧ и ФАПЧ соответственно). Особое место в работе устройств формирования высокостабильных электрических колебаний занимает система ФАПЧ, которая и обеспечивает высокие точность и стабильность формируемых колебаний. К сожалению, современные системы ФАПЧ имеют недостатки, обусловленные их конструктивными особенностями и пределами технических характеристик современной электронной элементной базы, что ограничивает

функциональные возможности этих систем [4–7]. Современные системы ФАПЧ имеют ограниченные частотные диапазоны полос захвата и удержания, имеются ограничения по быстродействию и устойчивости работы этих систем.

Реализация возможностей современной фотоники при построении современных систем ФАПЧ является актуальным направлением улучшения их технических характеристик, а именно — повышения быстродействия и устойчивости этих систем с расширением полос захвата и удержания, повышения чувствительности при работе с электрическими сигналами низкого уровня. Известно [2–3], что наиболее высокими техническими характеристиками обладают фотонные устройства, в которых используются голографические конструктивные элементы.

Целью статьи является исследование вопроса использования объёмных отражательных голограмм при схемотехнической реализации фотонной системы ФАПЧ.

Для достижения цели статьи решаются следующие задачи:

1. Построение структурной схемы фотонной системы ФАПЧ с объёмной отражательной голограммой в её конструкции.

2. Разработка и исследование математической модели формирования интерферограммы в фотонной голографической системе ФАПЧ.

Построение структурной схемы фотонной системы ФАПЧ с объёмной отражательной голограммой в её конструкции

По определению фотоники процессы преобразования сигналов в фотонном устройстве должны осуществляться в оптическом диапазоне длин волн [1]. Применительно к системе ФАПЧ это означает, что выходными колебаниями подстраиваемого и опорного генераторов должна обеспечиваться модуляция параметров взаимно когерентных световых потоков, соответствующего каждому из генераторов. Параметры модулируемых световых потоков должны однозначно отражать мгновенные значения

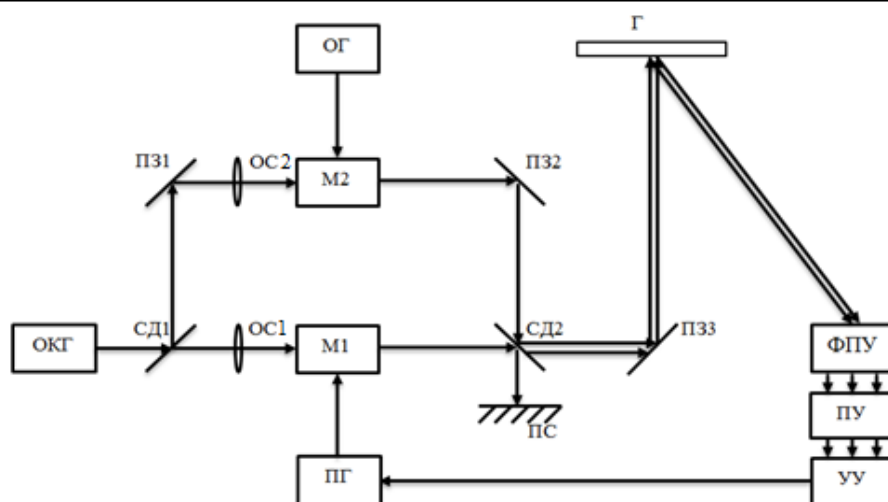


Рис. 1. Структурная схема фотонной голографической системы фазовой автоподстройки частоты

фазы соответствующего модулирующего электрического колебания с выходов подстраиваемого и опорного генераторов. В этом случае разность фаз выходных колебаний подстраиваемого и опорного генераторов фиксируется по параметрам пространственно-спектрального распределения интенсивности оптического поля в плоскости интерферограммы, формируемой когерентными световыми потоками, фазы которых модулированы выходными колебаниями этих генераторов. Для когерентных световых потоков со сферическими волновыми фронтами, формирующих интерферограмму, разность их фаз будет определяться набегом фазы каждого из световых потоков до плоскости интерференции. Таким образом, в качестве модулируемого параметра оптического излучения может использоваться набег его фазы.

Для светового потока со сферическим волновым фронтом изменение кривизны его волнового фронта будет определять изменение его набег фазы в плоскости интерференции. Для двух интерферирующих сферических волн величина разности набег их фаз будет определять строго соответствующее этому изменению параметров интерферограммы. Известно [8], что параметры интерферограммы однозначно соответствуют разности фаз интерферирующих световых потоков. Таким образом, резуль-

тат сравнения разности фаз световых потоков, модулированных электрическими колебаниями опорного и подстраиваемого генераторов, будет однозначно определяться параметрами интерферограммы, формируемой этими световыми потоками, а, значит, и разностью фаз выходных колебаний опорного и подстраиваемого генераторов. В этом случае, измерение фазовой разности опорного и подстраиваемого генераторов сводится к анализу параметров интерферограммы, формируемой модулированными световыми потоками. Для повышения чувствительности и точности измерений фазовой разности интерферирующих световых потоков может быть использована объёмная отражательная голограмма точечного источника света, которая обеспечивает концентрацию энергии интерферирующих световых потоков в центральную область интерферограммы и повышение её контрастности [9]. Использование объёмной отражательной голограммы в схеме фотонной системы ФАПЧ позволяет определить эту систему, как фотонную голографическую систему ФАПЧ. На рис. 1 показан один из вариантов структурной схемы такой системы ФАПЧ.

На рис. 1 использованы следующие обозначения: ОКГ — оптический квантовый генератор (лазер); СД-1, СД-2 — светоделители;

ОС-1, ОС-2 — оптические системы; ПЗ-1, ПЗ-2, ПЗ-3 — поворотные зеркала; М1, М2 — модуляторы светового потока; ПГ — подстраиваемый генератор; ОГ — опорный генератор; ПС — поглотитель света; Г — эталонная отражательная голограмма; ФПУ — фотоприёмное устройство; ПУ — пороговое устройство; УУ — устройство управления.

Система ФАПЧ, представленная на рис. 1, работает следующим образом. Излучаемый лазером (ОКГ) когерентный световой поток светоделителем СД-1 делится на два световых потока, один из которых проходит СД-1 насквозь и поступает на оптическую систему ОС-1, а второй направляется СД-1 на поворотное зеркало ПЗ1, отражается этим зеркалом и поступает на оптическую систему ОС-2. Оптические системы ОС-1 и ОС-2 фокусируют падающие на них световые потоки внутри модуляторов М1 и М2, которые представляют собой оптически прозрачные кристаллы из электрооптического материала (например, ниобата лития [10]). На боковые грани этих кристаллов (верхнюю и нижнюю на рис. 1) встречно-штыревым способом нанесены электроды. Использование встречно-штыревого способа нанесения электродов обеспечивает возможность снижения величины модулирующего напряжения, подаваемого на модулятор.

На электроды модулятора М1 подаётся усиленное модулирующее колебание с выхода подстраиваемого генератора ПГ, а на электроды модулятора М2 подаётся усиленное модулирующее колебание с выхода опорного генератора ОГ. Под воздействием модулирующих напряжений точки фокусировки световых потоков в модуляторах (являющиеся фазовыми центрами для световых потоков на выходах модуляторов) перемещаются вдоль оптических осей этих световых потоков, изменяя, тем самым, кривизну их волновых фронтов на выходах модуляторов.

Световой поток с выхода модулятора М1 падает на светоделитель СД-2, частично проходит через него и попадает на поворотное зеркало ПЗ-3, которое направляет его в плос-

кость отражательной голограммы Г, а часть этого светового потока направляется на поглотитель света ПС. Голограмма Г представляет собой объёмную отражательную голограмму точечного источника света, записанную во встречных световых пучках. Световой поток с выхода модулятора М2 направляют на поворотное зеркало ПЗ-2, которое поворачивает его в направлении входной плоскости светоделителя СД-2. Светоделитель СД2 направляет часть светового потока, падающего на него, на поворотное зеркало ПЗ-3. Поворотное зеркало ПЗ-3 направляет этот световой поток в плоскость отражательной голограммы Г. Часть светового потока, падающего на СД-2, проходит СД-2 и попадает на поглотитель света ПС.

Световые потоки со сферическими волновыми фронтами, модулированные в оптических модуляторах М1 и М2 усиленными выходными колебаниями генераторов ПГ и ОГ соответственно, дифрагируют от отражательной голограммы Г и, в плоскости ФПУ, формируют интерференционную картину.

Параметры пространственно-спектрального распределения интенсивности оптического поля в плоскости сформированной интерферограммы в каждый момент времени будут определяться разностью в кривизне волновых фронтов интерферирующих световых потоков, которая будет зависеть от амплитуд и фаз, усиленных модулирующих электрических колебаний с выходов генераторов ПГ и ОГ.

ФПУ представляет собой набор отдельных дискретных фотоприёмников, выполненных в виде линейки, при этом выход каждого из фотоприёмников электрически соединён с соответствующим ему входом ПУ, которое выполнено в виде линейки отдельных пороговых устройств. На выходах ПУ формируется параллельный двоичный код, соответствующий распределению интенсивности оптического поля в плоскости интерферограммы. Этот код поступает на входы УУ, которое анализирует эти коды, вырабатывает и передаёт в схему ПГ управляющий сигнал для коррекции частоты и

фазы выходных колебаний ПГ. В качестве УУ может быть использован микроконтроллер.

Для оценки чувствительности фотонной голографической системы ФАПЧ к изменению разности фаз интерферирующих световых потоков, модулированных выходными колебаниями опорного и подстраиваемого генераторов, необходимо разработать и исследовать математическую модель формирования интерферограммы в этой системе.

Разработка математической модели формирования интерферограммы в фотонной голографической системе ФАПЧ

Для построения математической модели формирования интерферограммы в фотонной голографической системе ФАПЧ рассмотрим рис. 2.

Рис. 2 позволяет записать уравнение объёмной отражательной голограммы после её экспонирования и записать соотношения для анализа амплитудно-фазового распределения интенсивности оптического поля в плоскости интерферограммы, формируемой с использованием этой голограммы. На рис. 2 использованы следующие обозначения: 1 — объёмная отражательная голограмма точечного источника света S_1 , записанная во встречных световых пучках; xoy — прямоугольная система координат; $S_{\text{он}}^*$ — мнимый опорный точечный источник света, являющийся зеркальным отражением действительного опорного точечного источника света, формирующего, при экспонировании голограммы, световой поток, встречный световому потоку точечного источника света S_1 (для удобства рассмотрения рис. 2 действительный точечный источник света $S_{\text{он}}$ на этом рисунке перенесён зеркально относительно плоскости объёмной отражательной голограммы 1 в верхнюю правую четверть системы координат xoy); S_1 — точечный источник света, расположенный на оси y ; S_2 — расположенный на оси y точечный источник света, кривизна волнового фронта светового по-

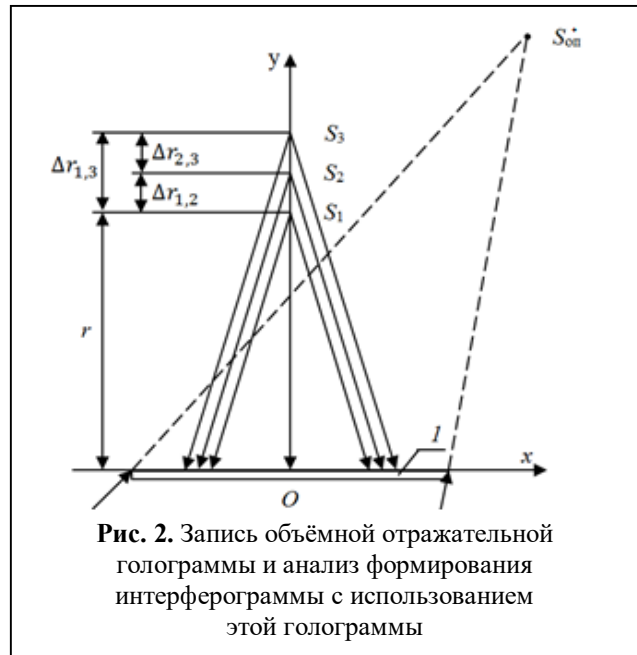


Рис. 2. Запись объёмной отражательной голограммы и анализ формирования интерферограммы с использованием этой голограммы

тока, формируемого которым, соответствует мгновенному значению кривизны волнового фронта светового потока, модулированного в модуляторе М1 и падающего на объёмную отражательную голограмму Г (см. рис. 1); S_3 — точечный источник света, расположенный на оси y , кривизна волнового фронта светового потока, формируемого которым, соответствует мгновенному значению кривизны волнового фронта светового потока, модулированного в модуляторе М2 и падающего на отражательную голограмму Г (см. рис. 1); r — расстояние по оси y от точечного источника света S_1 до плоскости объёмной отражательной голограммы при её экспонировании; Δr_{12} — расстояние между точечными источниками света S_1 и S_2 ; Δr_{13} — расстояние между точечными источниками света S_1 и S_3 ; Δr_{23} — расстояние между точечными источниками света S_2 и S_3 .

Для записи соотношений, описывающих интерференцию световых потоков в плоскости объёмной отражательной голограммы Г, введём переменные: r_1, r_2, r_3 — расстояние от точечного источника света S_1, S_2 и S_3 соответственно до произвольной точки в плоскости голограммы; $r_{\text{он}}$ — расстояние от точечного источника света $S_{\text{он}}$ до произвольной точки в плоскости голограммы.

Пусть опорный точечный источник света $S_{оп}$ и точечный источник света S_1 при экспонировании отражательной голограммы во встречных световых пучках формируют в произвольной точке P плоскости голографической фотопластинки соответствующие оптические поля (рис. 2) [11–14]:

$$E_{ps_{оп}} = \frac{E_{оп}}{r_{оп}} \exp\{-j[\omega t + kr_{оп} + \varphi_{оп} + \psi(r_{оп})]\}, \quad (1)$$

$$E_{ps_1} = \frac{E_1}{r_1} \exp\{j[\omega t + kr_1 + \varphi_1 + \psi(r)]\}. \quad (2)$$

В этом случае будет экспонирована голограмма, уравнение которой может быть записано следующим образом:

$$T = T_0 + T_1 \cdot \cos k(r_1 - r_{оп}), \quad (3)$$

где T_0 — коэффициент отражения прямой волны; T_1 — коэффициент отражения дифрагированной волны.

Осветим экспонированную объёмную отражательную голограмму световыми потоками, формируемыми точечными источниками света S_2 и S_3 . Световые потоки S_2 и S_3 когерентны и, в области их перекрытия на этой голограмме, формируется интерферограмма в виде интерференционных полос кольцевой формы. Для удобства рассмотрения процесса формирования интерферограммы оптические поля, формируемые на рис. 2 точечными источниками света S_2 и S_3 , будем записывать в комплексной форме представления. Оптические поля для точечных источников света S_2 и S_3 по аналогии с (2) могут быть записаны в виде:

$$E_{ps_2} = \frac{E_2}{r_2} \exp\{j[\omega t + kr_2 + \varphi_2 + \psi(r)]\}, \quad (4)$$

$$E_{ps_3} = \frac{E_3}{r_3} \exp\{j[\omega t + kr_3 + \varphi_3 + \psi(r)]\}. \quad (5)$$

В этом случае, с учётом рис. 2, после несложных преобразований можно записать выражение для интенсивности оптического поля в плоскости экспонированной объёмной отражательной голограммы 1:

$$I_{сумм} = I_0 + I_1 [e^{jk(r_3-r_2)} + e^{-jk(r_3-r_2)}], \quad (6)$$

где I_0 — амплитуда интенсивности постоянного светового фона; I_1 — амплитуда интенсивности интерференционного члена.

Используя формулу Эйлера [15], запишем выражение для интенсивности оптического поля, формируемого в плоскости объёмной отражательной голограммы 1 (рис. 2) световыми потоками точечных источников света S_2 и S_3 в виде:

$$I_{сумм} = I_0 + 2I_1 \cos[k\Delta r_{23}], \quad (7)$$

где $k\Delta r_{23} = k(r_3 - r_2) = \Delta\varphi$.

С учётом рис. 2 и выполнения условия оптического приближения для точечных источников света S_2 и S_3 ($r_2 \gg l$ и $r_3 \gg l$, где l — максимальный линейный размер голограммы) [8], можно записать:

$$\Delta\varphi = k(\Delta r_{13} - \Delta r_{12}) \cdot \left[1 - \frac{x^2}{(r + \Delta r_{13})(r + \Delta r_{12})} \right]. \quad (8)$$

Используя выражение (8) исследуем характер распределения в плоскости объёмной отражательной голограммы фазы суммарного светового потока, формируемого точечными источниками света S_2 и S_3 . Построим для этого график зависимости $\Delta\varphi = f(x)$. Исходные данные для проведения математического моделирования представлены в таблице 1.

По результатам математического моделирования построена графическая зависимость, представленная на рис. 3.

Графическая зависимость, представленная на рис. 3, показывает, что фаза суммарного светового потока в плоскости голограммы из-

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

Переменная	Диапазон
x , м	-0,064, -0,062586 ... 0,064648
$\varphi(x)$, рад	-1,27E+01 ... 1,99E+01

меняется по инверсному параболическому закону с максимумом в точке с нулевой координатой на оси x .

С учётом соотношений (7) и (8) исследуем характер пространственно-спектрального распределения амплитуды интенсивности интерференционного члена суммарного светового потока в плоскости объёмной отражательной голограммы. Построим для этого график зависимости нормированной амплитуды интенсивности

интерференционного члена суммарного светового потока от координаты x в плоскости этой голограммы. Исходные данные для проведения математического моделирования представлены в таблице 2.

Результаты проведённого математического моделирования представлены на рис. 4 в виде графической зависимости нормированного значения амплитуды интенсивности интерференционного члена суммарного светового потока от координаты x в плоскости этой голограммы.

Анализ графических зависимостей, представленных на рис. 3 и 4, показывает, что путём измерения и анализа параметров интерферограммы, с высокой чувствительностью и точностью может быть измерена разность фаз световых потоков, формирующих эту интерферограмму. Различным значениям разности фаз световых потоков всегда будет соответствовать однозначное пространственно-спектральное распределение интенсивности оптического поля в плоскости интерференции. При этом интерферограмма, сформированная в плоскости объёмной отражательной голограм-



Рис. 3. Зависимость распределения фазы интенсивности суммарного светового потока в плоскости объёмной отражательной голограммы

мы Γ (рис. 1) проецируется в плоскость ФПУ с учётом фокусирующих свойств этой голограммы и с учётом дифракционной концентрации энергии светового потока, дифрагировавшего от этой голограммы, в центральную область интерферограммы [9, 10].

Из выражения (7) видно, что максимальная чувствительность по изменениям интенсивности суммарного светового потока зависит от крутизны графика функции косинуса и повторяется через каждую четверть её периода [8, 10]. Это соответствует изменениям параметра Δr_{23} на уровне порядка 10^{-6} м.

Максимальная чувствительность при измерении и анализе изменений параметров пространственно-спектрального распределения интенсивности оптического поля на интерферограмме будет наблюдаться в точках, которые соответствуют наибольшей крутизне изменений функции распределения нормированной интенсивности светового потока в плоскости голограммы. Графическая зависимость на рис. 4 позволяет сделать вывод о том, что точки максимальной чувствительности соответствуют половинному значению функции нор-

Таблица 2. Исходные данные для моделирования

Переменная	Диапазон
$x, м$	$-0,64, -0,062586 \dots 0,64648$
$I_{норм}(x)$	$0 \dots 1$

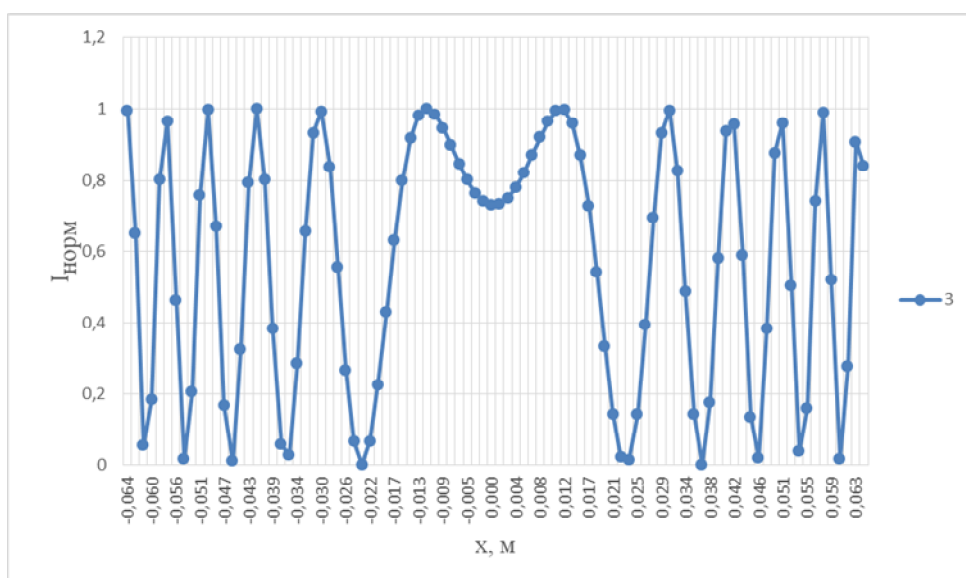


Рис. 4. График зависимости нормированного значения амплитуды интенсивности интерференционного члена суммарного светового потока от координаты x

мированной интенсивности светового потока.

Таким образом, можно сделать обоснованный вывод о возможности измерения разности фаз выходных колебаний опорного и подстраиваемого генераторов (рис. 1), модулирующих фазы когерентных световых потоков, путём измерения и анализа пространственно-спектрального распределения интенсивности оптического поля в плоскости интерферограммы, формируемой в плоскости объёмной отражательной голограммы этими когерентными световыми потоками. Это позволяет реализовать на практике голографическую фотонную систему ФАПЧ с улучшенными техническими характеристиками.

Заключение

Перспективным направлением улучшения технических характеристик аппаратуры телекоммуникационных систем является всё более широкое использование в её конструкции фотонных конструктивных элементов. По сравнению с электронными аналогами телекоммуникационные устройства с использованием фотоники имеют более высокое быстродействие, больший динамический диапазон, как по частоте, так и по уровню информационного сигнала, обеспе-

чивают снижение энергопотребления и уровня шумов, возможность вариации параметров и характеристик сигналов в широком диапазоне значений. Применительно к системам ФАПЧ использование фотонных конструктивных элементов открывает возможность повышения быстродействия и устойчивости этих систем с расширением полос захвата и удержания, повышение чувствительности при работе с электрическими сигналами низкого уровня. При этом наиболее высокими техническими характеристиками обладают фотонные устройства, в которых используются голографические конструктивные элементы. В статье представлен вариант структурной схемы фотонной системы ФАПЧ с объёмной отражательной голограммой в её конструкции. В этой схеме сигналами, пропорциональными выходным колебаниям опорного и подстраиваемого генераторов модулируются фазы соответствующих этим генераторам когерентных световых потоков, формирующих интерферограмму. Оптическая система с объёмной голограммой в конструкции фотонной голографической системы ФАПЧ по аналогии с электронной системой ФАПЧ решает задачу фазового детектора, но без ограничений на частотные диапазоны полос захвата и удержа-

ния. Объёмная голограмма в такой системе ФАПЧ обеспечивает повышение чувствительности и точности измерений фазовой разности интерферирующих световых потоков, а также концентрирует их энергию в центральную область интерферограммы. Объёмная отражательная голограмма является элементом, чувствительным к фазе, частоте и кривизне волнового фронта падающего на неё когерентного светового потока. Использование объёмной отражательной голограммы в схеме фотонной системы ФАПЧ позволяет определить эту систему, как фотонную голографическую систему ФАПЧ. Построена и исследована математическая модель формирования интерферограммы в этой системе. Путём измерения и анализа параметров интерферограммы с высокой чувствительностью и точностью может быть измерена разность фаз световых потоков, формирующих эту интерферограмму. Таким образом, имеется возможность измерения разности фаз выходных колебаний опорного и подстраиваемого генераторов, модулирующих фазы когерентных световых потоков, путём измерения и анализа пространственно-спектрального распределения интенсивности оптического поля в плоскости интерферограммы, формируемой в плоскости объёмной отражательной голограммы этими когерентными световыми потоками. Это позволяет реализовать на практике голографическую фотонную систему ФАПЧ с улучшенными техническими характеристиками.

Литература

1. Межведомственная программа исследований и разработок в области фотоники на 2017–2020 годы. Разработана на основании Протокола заседания президиума Совета при Президенте РФ по модернизации экономики и инновационному развитию России от 9 июля 2014 г. № 4. URL: <http://www.sib-science.info/news/files/russia-foton-programm-16122016/photonicprogram.pdf> (дата обращения 2.09.2021).

2. Габриэлян Д.Д., Демченко В.И., Караваев С.В., Михайлов Н.А., Прыгунов А.Г. Тракт формирования управляющего сигнала голографической системы автоматической регулировки усиления и его моделирование // Радиотехника. 2019. Том 83, № 7(9). С. 215–221.

3. Звездина М.Ю., Елисеев А.В., Прыгунов А.Г., Русанов Р.И. Использование голографии в задаче стабилизации частоты генераторного оборудования // Электросвязь. 2018. № 12. С. 29–34.

4. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации / Под ред. В.В. Шахгильдяна. М.: Радио и связь, 1989. 320 с.

5. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки/ В.А. Левин [и др.]. М.: Радио и связь, 1989. 231 с.

6. Curtin M., O'Brien P. Phase Locked Loops for High-Frequency Receivers and Transmitters // Analog Dialogue, Analog Devices. 1999. Vol. 33, No. 3. Pp. 3–4; No. 5. Pp. 1–2.

7. Fague D. Othello TM: A New Direct-Conversion Radio Chip Set Eliminates IF Stages // Analog Dialogue, Analog Devices. 1999. Vol. 33, No. 10. Pp. 1–2.

8. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985. 351 с.

9. Безуглов Д.А., Прыгунов А.Г., Трещёв В.В. Анализ дифракции в задаче измерения перемещений объектов пространственно-спектральным методом // Автометрия. 1998. № 5. С. 27–37.

10. Лебедев В.В. Исследование высокочастотной и сверхвысокочастотной модуляции оптического излучения в волноводных структурах на основе ниобата лития: диссертация ... кандидата физико-математических наук: 01.04.03 Радиофизика. Санкт-Петербург, 2016. 126 с.

11. Abramson N.N. Practical Interpretation of Holographic // Interferograms. Optik. 1973. Vol. 36. P. 337.

12. Arsenault H.H. Geometrical Optics of Holograms // J. Opt. Soc. Am. 1980. Vol. 65. P. 903.

13. Hariharan P. Optical Holography, principles, techniques and applications. Second edition, Cambridge University Press, 2013. 424 p.

14. Милер М. Голография / Перевод с чеш. А.С. Сударушкина, В.И. Лусникова. Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. 207 с.

15. Korn G.A., Korn T.M. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers, 2nd edn. New York: McGraw-Hill, 1968. 974 p.

Поступила 3 сентября 2021 г.

English

PHOTONIC PHASE-LOCKED LOOPED SYSTEM WITH VOLUME REFLECTION-TYPE HOLOGRAM

Alexandr Germanovich Prygunov — PhD, Associate Professor of Department of Radioelectronics, Don State Technical University.

E-mail: agprygunov@mail.ru

Yaroslav Nikolaevich Tuzko — Master's degree student, Don State Technical University.

E-mail: travel-ros-st@mail.ru

Address: 344003, Russian Federation, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1.

Abstract: The construction problem of photonic PLL (phase-locked looped) system with volume reflection-type hologram is considered. The relevance of solving this problem is validated. PLL system is essential for devices generating high-stable electrical oscillations, which ensures high accuracy and stability of generated oscillations. Unfortunately, current PLL systems have limited frequency capture and holding ranges, and there are performance and stability constraints for these systems, as well as constraints for amplitudes of stabilized oscillations. Implementation of photonics capability in constructing today's LPP systems is a relevant trend to improve their technical performance. Photonic devices have the highest technical performance where holographic structural elements are used. The article presents and describes the option for block diagram of photonic PLL system with volume reflection-type hologram in its design. Process mathematical model for forming interferogram in this system was developed and investigated. Phase difference can be measured by analyzing interferogram parameters. The work determines parameters sensitivity of this interferogram concerning spatial position of phase center in light flux source with spherical wave-front modulated by electrical signal proportional to the output signal of controllable generator in PLL system. Well-founded conclusion was made about feasibility of holographic photonic PLL system with improved technical performance.

Keywords: photonics, phase-locked loop, volume reflection-type hologram, optical emission, modulation, light flux phase, phase detector, interferogram, mathematical model, sensitivity.

References

1. Interdepartmental program of research and development in the field of photonics for 2017-2020. Developed on the basis of the Minutes of the meeting of the Presidium of the Presidential Council for Economic Modernization and Innovative Development of Russia dated July 9, 2014 No. 4. URL: <http://www.sib-science.info/news/files/russia-foton-programm-16122016/photonicsprogram.pdf> (access date 2.09.2021).

2. *Gabrielyan D.D., Demchenko V.I., Karavaev S.V., Mikhailov N.A., Prygunov A.G.* The path of formation of the control signal of the holographic system of automatic gain control and its modeling. *Radiotekhnika*. 2019. Volume 83, No. 7(9). Pp. 215–221.

3. *Zvezdina M.Yu., Eliseev A.V., Prygunov A.G., Rusanov R.I.* The use of holography in the problem of frequency stabilization of generator equipment. *Elektrosvyaz'*. 2018. No. 12. Pp. 29–34.

4. Phase synchronization systems with sampling elements / Edited by *V.V. Shakhgildyan*. Moscow: Radio i svyaz', 1989. 320 p.

5. *Levin V.A.* [et al.] Frequency synthesizers with a pulse-phase auto-tuning system. Moscow: Radio and Communications, 1989. 231 p.

6. Curtin M., O'Brien P. Phase Locked Loops for High-Frequency Receivers and Transmitters. *Analog Dialogue, Analog Devices*. 1999. Vol. 33, No. 3. Pp. 3–4; No. 5. Pp. 1–2.

7. Fague D. Othello TM: A New Direct-Conversion Radio Chip Set Eliminates IF Stages. *Analog Dialogue, Analog Devices*. 1999. Vol. 33, No. 10. Pp. 1–2.

8. *Matveev A.N.* Optics. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 351 p

9. *Bezuglov D.A., Prygunov A.G., Trepachev V.V.* Diffraction analysis in the problem of measuring the movements of objects by the spatial-spectral method. *Avtometriya*. 1998. No. 5. Pp. 27–37.

10. *Lebedev V.V.* Investigation of high-frequency and ultrahigh-frequency modulation of optical radiation in waveguide structures based on lithium niobate: dissertation ... Candidate of Physical and Mathematical Sciences: 01.04.03 Radiophysics. St. Petersburg, 2016. 126 p.

11. *Abramson N.N.* Practical Interpretation of Holographic Interferograms. *Optik*, 1973. Vol. 36. Pp. 337.

12. *Arsenault H.H.* Geometrical Optics of Holograms. *J. Opt. Soc. Am.* 1980. Vol. 65. P. 903.

13. *Hariharan P.* Optical Holography, principles, techniques and applications. Second edition, Cambridge University Press, 2013. 424 p.

14. *Miler M.* Holography. Translation from Czech by A. Sudarushkin and V. Lusnikov; 1979. Leningrad: Mashinostroenie. 207 p.

15. *Korn G.A., Korn T.M.* Mathematical Hand-book for Scientists and Engineers, 2nd edn. New York: McGraw-Hill, 1968. 974 p.