

Телевизионные системы, передача и обработка изображений

DOI 10.24412/2221-2574-2022-3-64-75

УДК 535.4(076.5)

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ФОТОННАЯ СИСТЕМА ЧАСТОТНОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ АППАРАТУРЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Назарова Ольга Юрьевна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»¹.

E-mail: olga2018rostov@yandex.ru

Прыгунов Александр Германович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»¹.

E-mail: agprygunov@mail.ru

Шилина Анна Николаевна

кандидат технических наук, доцент войск связи военного учебного центра при ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»².

E-mail: kurnevakaty@mail.ru

¹Адрес: 344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1.

²Адрес: 346428, Российская Федерация, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132.

Аннотация: Предлагается вариант конструкции голографической фотонной системы частотной автоподстройки частоты (ЧАПЧ) для аппаратуры перспективных систем телекоммуникаций. Показано, что предложенный подход к построению системы ЧАПЧ обеспечивает повышенное быстродействие, расширение полос захвата и удержания, а также уменьшение величины остаточной расстройки частоты. Разработан вариант структурной схемы голографической фотонной системы ЧАПЧ и описана работа этой схемы. Проведено математическое моделирование и исследованы параметры пространственно-спектрального распределения интенсивности оптического поля в плоскости интерферограммы, формируемой голографическим интерферометром в схеме фотонной голографической системы ЧАПЧ. Построены графические зависимости, анализ которых позволил сделать вывод об эффективности использования голографического интерферометра в разработанном варианте схемной реализации голографической фотонной системы ЧАПЧ.

Ключевые слова: системы телекоммуникаций, стабильность частоты, частотная автоподстройка частоты, фотоника, голография, чувствительность измерений, параметры интерферограммы.

Актуальность задачи

Для работы аппаратуры формирования, передачи, приёма и обработки сигналов в радиотехнических и телекоммуникационных системах, независимо от их назначения, необходимо иметь источники высокостабильных электрических колебаний, которые обеспечивают функционирование этих систем с требуемыми техническими характеристиками [1–4]. В качестве таких источников высокостабиль-

ных колебаний используют электронные синтезаторы частот, в состав которых входят высокостабильные опорные генераторы. Для повышения стабильности частот выходных колебаний электронного генераторного оборудования используют электронные системы частотной и фазовой автоматической подстройки частоты автогенератора (ЧАПЧ и ФАПЧ соответственно) [1–4].

Как правило, системы ЧАПЧ и ФАПЧ используются комплексно. Каждая из этих систем имеет своё функциональное назначение. Достоинством системы ЧАПЧ являются её хорошие фильтрующие свойства. Однако эта система имеет существенный недостаток, который заключается в наличии остаточной расстройки частоты [1–4]. Этот факт делает неприменимой систему ЧАПЧ в синтезаторах частот в качестве основной системы стабилизации частоты их выходных колебаний. Система ЧАПЧ в этих устройствах играет лишь вспомогательную роль и используется совместно с системой ФАПЧ, которая и обеспечивает точность автоподстройки частоты.

Особенностью системы ЧАПЧ является отсутствие непосредственного сравнения частот [1–4]. Частота подстраиваемого генератора в этой системе, опираясь на частоту составляющей сетки, смещается вниз и преобразуется в частоту дискриминатора (частотного детектора). В том случае, если преобразованная частота подстраиваемого генератора отличается от частоты дискриминатора, то на его выходе появится управляющее напряжение. Величина и знак этого управляющего напряжения будут определяться величиной и знаком расстройки частоты выходных колебаний подстраиваемого генератора от номинального значения. Это управляющее напряжение используется для подстройки частоты генератора с помощью управителя (реактивного элемента). Подстройка частоты генератора будет продолжаться до тех пор, пока управляющее напряжение и соответствующая ему расстройка не достигнут величины, которая определяется точкой пересечения характеристик частотного дискриминатора и управителя. Эта точка пересечения характеристик соответствует состоянию устойчивого равновесия системы ЧАПЧ.

Таким образом, в результате работы системы ЧАПЧ начальная расстройка частоты выходных колебаний подстраиваемого генератора уменьшается, но не сводится к нулю [1–4]. При этом, в силу конструктивных особенностей, работа системы ЧАПЧ по автоматиче-

скому регулированию частоты начинается при значительно большем отклонении значения этой частоты от номинала, чем работа системы ФАПЧ. Однако недостатки системы ЧАПЧ ограничивают область её практического использования. Недостатки системы ЧАПЧ в виде ограниченных диапазонов частот захвата и удержания, а также наличия остаточной расстройки частоты обусловлены характеристиками частотного дискриминатора и управителя в составе этой системы, а также ограниченным диапазоном устойчивой работы этой системы [1–4].

Задача расширения диапазонов частот захвата и удержания системы ЧАПЧ, а также снижения уровня остаточной расстройки частоты может быть решена путём построения конструкции этой системы с использованием нового научного и технического подхода. Возможным решением этой задачи представляется использование в конструкции перспективной системы ЧАПЧ элементов голографической фотоники.

Целью статьи является решение задачи построения голографической фотонной системы ЧАПЧ.

Для достижения поставленной цели статьи решаются следующие вопросы:

1. Построение и обоснование структурной схемы голографической фотонной системы частотной автоподстройки частоты.
2. Исследование параметров интерферограммы, формируемой в голографической фотонной системе частотной автоподстройки частоты.

1. Построение и обоснование структурной схемы голографической фотонной системы частотной автоподстройки частоты

Построение голографической фотонной системы ЧАПЧ может быть основано на использовании явления голографической интерферометрии [5]. Технология построения голографической фотонной системы ЧАПЧ может быть реализована с использованием модуляции когерентного светового потока усиленными вы-

ходными колебаниями подстраиваемого генератора с использованием в качестве модулируемых параметров этого светового потока кривизны его волнового фронта или направления его падения на объёмную отражательно-пропускающую Фурье-голограмму голографического интерферометра [5–7]. При этом голографический интерферометр формирует интерферограмму, мгновенное значение параметров которой однозначно соответствует конкретному значению частоты подстраиваемого генератора. В этом случае характер изменений пространственно-спектрального распределения интенсивности оптического поля в плоскости формируемой интерферограммы будет однозначно соответствовать изменениям мгновенных значений амплитуды, частоты и фазы выходных колебаний подстраиваемого генератора (ПГ). В схеме такой голографической фотонной системы ЧАПЧ голографический интерферометр состоит из двух конструктивных элементов: объёмной отражательно-пропускающей Фурье-голограммы и плоского зеркала, размещённого непосредственно за этой голограммой и под малым углом к ней. Голографический интерферометр в системе ЧАПЧ реализует пространственно-спектральный метод голографической интерферометрии [8, 9]. В схеме голографической фотонной системы ЧАПЧ голографический интерферометр такого типа выполняет функцию частотного дискриминатора, формирующего световой поток с волновым фронтом, соответствующим тому или иному, в том числе и эталонному значению частоты выходных колебаний подстраиваемого генератора. Эталонном каждого значения частоты выходных колебаний ПГ в такой системе ЧАПЧ является строго конкретное пространственно-спектральное распределение интенсивности оптического поля в плоскости голографической интерферограммы, параметры которого могут быть зафиксиро-

рованы. Для фиксации этих параметров могут быть использованы линейки или матрицы микрофотоприёмников, выходные сигналы которых преобразуются пороговыми устройствами в позиционный цифровой двоичный код. При изменении кривизны волнового фронта светового потока, модулируемого усиленными выходными колебаниями подстраиваемого генератора и падающего на объёмную Фурье-голограмму голографического интерферометра, происходит соответствующее этому изменение параметров формируемой интерферограммы. Это изменение может быть зафиксировано и использовано для выработки сигнала рассогласования между требуемым и реальным значением частоты выходных колебаний ПГ. Полученный сигнал рассогласования может быть использован для коррекции значения частоты выходных колебаний ПГ. Именно этот факт позволяет использовать голографический интерферометр в качестве частотного дискриминатора голографической фотонной системы ЧАПЧ.

Вариант структурной схемы голографической фотонной системы ЧАПЧ представлен на рис. 1.

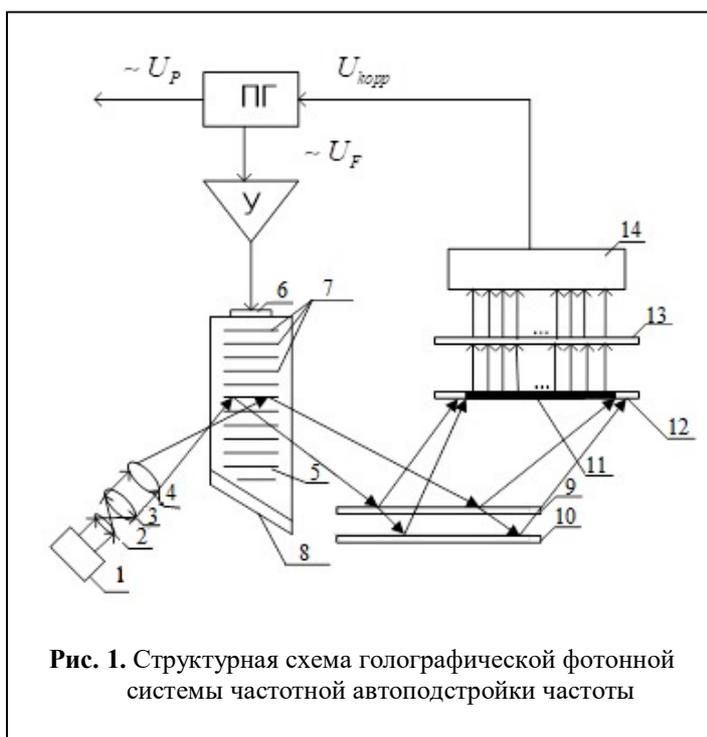


Рис. 1. Структурная схема голографической фотонной системы частотной автоподстройки частоты

На рис. 1 использованы следующие обозначения: 1 — лазер; 2 — конденсорная линза; 3 — коллимирующая линза; 4 — фокусирующая (собирающая) линза; 5 — оптически прозрачная акустооптическая ячейка; 6 — пьезопреобразователь; 7 — максимумы акустической волны в акустооптической ячейке; 8 — поглотитель энергии акустической волны; 9 — объёмная отражательно-пропускающая Фурье-голограмма; 10 — плоское зеркало; 11 — область перекрытия интерферирующих световых потоков; 12 — линейка фотоприёмных устройств (ЛФУ); 13 — линейка пороговых устройств (ЛПУ); 14 — устройство управления; ПГ — подстраиваемый генератор; У — усилитель; $\sim U_F$ — напряжение электрического колебания на выходе ПГ; $U_{корр}$ — напряжение сигнала коррекции частоты выходных колебаний ПГ.

Устройство, представленное на рис. 1, работает следующим образом. Лазер 1 излучает когерентный световой поток, который направляют на коллиматор, состоящий из конденсорной и коллимирующей линз 2 и 3 соответственно. С выхода коллимирующей линзы 3 световой поток направляют на длиннофокусную собирающую линзу 4, которая направляет этот световой поток на оптически прозрачную акустооптическую ячейку 5. Подстраиваемый генератор ПГ формирует выходной сигнал с частотой колебаний F . Этот электрический сигнал усиливается усилителем У и подаётся на пьезопреобразователь 6. Сигнал пьезопреобразователя 6 формирует в оптически прозрачной акустооптической ячейке 5 бегущую акустическую волну, энергия которой поглощается поглотителем энергии акустической волны 8. Оптически прозрачная акустооптическая ячейка 5, пьезопреобразователь 6 и поглотитель энергии акустической волны 8 представляют собой акустооптический дефлектор.

Известно [10–12], что акустооптический дефлектор такого типа обладает высоким разрешением и хорошим быстродействием, имеет широкий диапазон рабочих частот, позволяет

осуществлять как непрерывное сканирование луча света по произвольному закону, так и дискретное переключение в любое из разрешимых положений.

Акустооптический дефлектор в схеме на рис. 1 имеет простую конструкцию и управление, низкое энергопотребление и небольшие размеры. Дефлектор такого типа является дифракционным и принцип его действия основан на зависимости угла дифракции волны света от частоты упругой волны в оптически прозрачной акустооптической ячейке 5. При изменении частоты сигнала, подаваемого на пьезопреобразователь 6 дефлектора, все дифракционные максимумы, за исключением нулевого, сканируют по углу, причём угол сканирования пропорционален диапазону Δf изменения значений частоты колебаний на выходе ПГ. Световой поток с выхода собирающей линзы 4, дифрагировавший на ультразвуковой дифракционной решётке внутри оптически прозрачной акустооптической ячейки 5 дефлектора, направляется в плоскость объёмной отражательно-пропускающей Фурье-голограммы 9. Объёмная Фурье-голограмма 9 записана в линейном режиме во встречных световых пучках, имеющих сферические волновые фронты. Световой поток, падающий на эту голограмму, частично дифрагирует от неё в направлении ЛФУ 12, а частично проходит через неё и отражается плоским зеркалом 10, размещённым непосредственно за Фурье-голограммой 9 под небольшим углом к ней (угол не более пяти градусов). Световой поток, отражённый плоским зеркалом 10, повторно частично проходит через Фурье-голограмму 9 и падает в плоскость ЛФУ 12. В области перекрытия световых потоков 11 на входной плоскости ЛФУ 12 формируется интерференционная картина кольцевой формы [8]. Пространственно-спектральное распределение интенсивности оптического поля в плоскости формируемой интерферограммы в каждый момент времени будет однозначно определяться кривизной волнового фронта светового потока,

падающего на Фурье-голограмму 9 со стороны акустооптического дефлектора.

Таким образом, параметры распределения интенсивности оптического поля в плоскости интерферограммы будут однозначно зависеть от скорости и частоты ультразвуковой волны в оптически прозрачной акустооптической ячейке 5 дефлектора, т.е. от значений частоты выходных колебаний ПГ.

ЛФУ 12 состоит из набора отдельных микрофотоприёмников и является конструктивным элементом, позволяющим измерять параметры распределения интенсивности оптического поля в плоскости интерферограммы. Выход каждого из отдельных микрофотоприёмников ЛФУ 12 соединён со входом соответствующего этому микрофотоприёмнику порогового устройства ЛПУ13. На выходах ЛПУ 13 формируются электрические сигналы в виде комбинаций позиционного цифрового двоичного кода, значения символов в которых определяются интенсивностью света на том или ином микрофотоприёмнике ЛФУ 12 и установленным порогом срабатывания отдельных пороговых устройств ЛПУ 13. С выходов ЛПУ 13 каждая комбинация позиционного цифрового двоичного кода, соответствующая мгновенному значению распределения интенсивности оптического поля в плоскости интерферограммы, поступает на входы устройства управления 14.

Необходимо отметить, что каждой четверти периода выходных колебаний ПГ, подаваемых на акустооптический дефлектор, будет соответствовать строго определённая последовательность смены кодовых комбинаций позиционного цифрового двоичного кода, подаваемых на входы устройства управления 14. Устройство управления 14 сравнивает кодовые комбинации позиционного цифрового двоичного кода, поступающие на его входы с выходов ЛПУ 13, с эталонами, хранящимися в памяти этого устройства, вырабатывает и подаёт электрический сигнал для коррекции значения частоты выходных колебаний ПГ.

Особенностью структурной схемы голографической фотонной системы ЧАПЧ является отсутствие электрической связи между частотным дискриминатором, функции которого выполняет голографический интерферометр, и управителем ПГ, осуществляющим непосредственную коррекцию значений частоты выходных колебаний этого генератора. Диапазон частот захвата и удержания варианта схемы голографической фотонной системы ЧАПЧ, представленной на рис. 1, будет ограничен лишь диапазоном рабочих частот акустооптического дефлектора.

Таким образом, на рис. 1 представлен разработанный вариант структурной схемы голографической фотонной системы ЧАПЧ, обеспечивающей коррекцию частоты выходных колебаний ПГ в широком частотном диапазоне, превышающем диапазоны частот захвата и удержания известных электронных систем ЧАПЧ [1–4]. Схема разработанной системы ЧАПЧ обеспечивает возможность высокоточной коррекции значений частоты выходных колебаний ПГ. Точность подстройки частоты выходных колебаний ПГ разработанного варианта голографической фотонной системы ЧАПЧ будет определяться чувствительностью используемого голографического интерферометра, пространственной частотой интерференционных полос и интенсивностью светового потока в этих полосах, а также размерами отдельных микрофотоприёмников ЛФУ (рис. 1) и их чувствительностью

2. Исследование параметров интерферограммы, формируемой в голографической фотонной системе частотной автоподстройки частоты

Выражение для интенсивности светового потока в плоскости интерферограммы, формируемой голографическим интерферометром в схеме голографической фотонной системы ЧАПЧ, имеет вид [5, 6]:

$$I = I_0 + I_1 \cos \varphi, \quad (1)$$

где I_0 — слагаемое, характеризующее

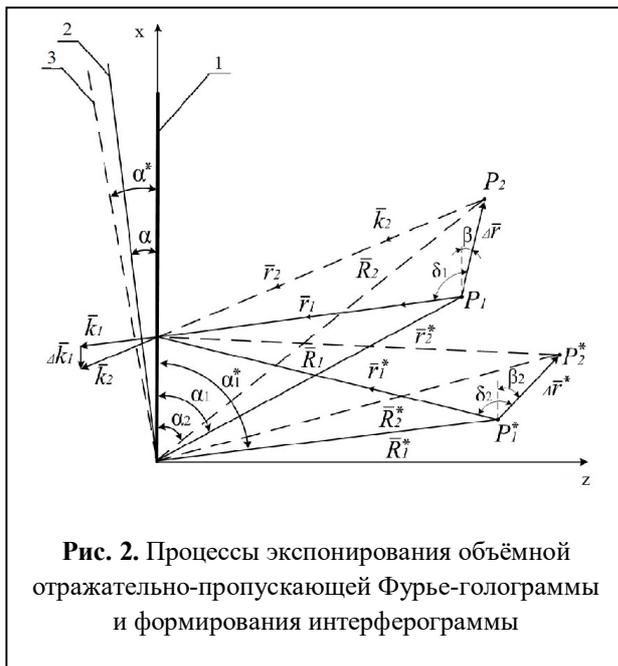


Рис. 2. Процессы экспонирования объёмной отражательно-пропускающей Фурье-голограммы и формирования интерферограммы

постоянный световой фон; I_1 — амплитуда интенсивности интерференционной составляющей светового потока в плоскости интерферограммы.

Для исследования параметров интерферограммы, формируемой голографическим интерферометром, выполняющим функцию частотного дискриминатора, воспользуемся оптической схемой (рис. 2) и математическими соотношениями, представленными в [6].

На рис. 2 использованы обозначения: 1 — объёмная отражательно-пропускающая Фурье-голограмма; 2 — положение плоского зеркала при экспонировании объёмной Фурье-голограммы 1; 3 — положение плоского зеркала в момент измерений; XOZ — прямоугольная система координат (ось X лежит в плоскости объёмной Фурье-голограммы 1); α — угол между голографической фотопластинкой и плоским зеркалом при экспонировании объёмной отражательно-пропускающей Фурье-голограммы 1; α^* — угол между объёмной Фурье-голограммой 1 и плоским зеркалом при проведении измерений; P_1 — положение в пространстве действительного точечного источника когерентного светового потока при экспонировании объёмной отражательно-

пропускающей Фурье-голограммы 1; P_1^* — положение в пространстве зеркального отражения действительного точечного источника когерентного светового потока при экспонировании объёмной отражательно-пропускающей Фурье-голограммы 1; P_2 — положение в пространстве действительного точечного источника когерентного светового потока при проведении измерений; P_2^* — положение в пространстве зеркального отражения действительного точечного источника когерентного светового потока при проведении измерений; $\vec{R}_i, \vec{R}_i^*, r_i, r_i^*, \Delta r, \Delta r^*$ и $\alpha, \alpha^*, \alpha_1, \alpha_2, \beta, \beta_2, \delta_1, \delta_2$ — соответственно векторы и углы, характеризующие положение в пространстве действительного и мнимого (сформированного плоским зеркалом) точечных источников когерентных световых потоков.

Основными расчётными соотношениями для проведения математического моделирования, представленными в работе [5], являются следующие:

$$I = I_1 \cos \varphi, \quad (2)$$

где I_1 — переменная составляющая интенсивности светового потока в плоскости интерференции;

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r (\cos \delta_1 - \cos \delta_2); \quad (3)$$

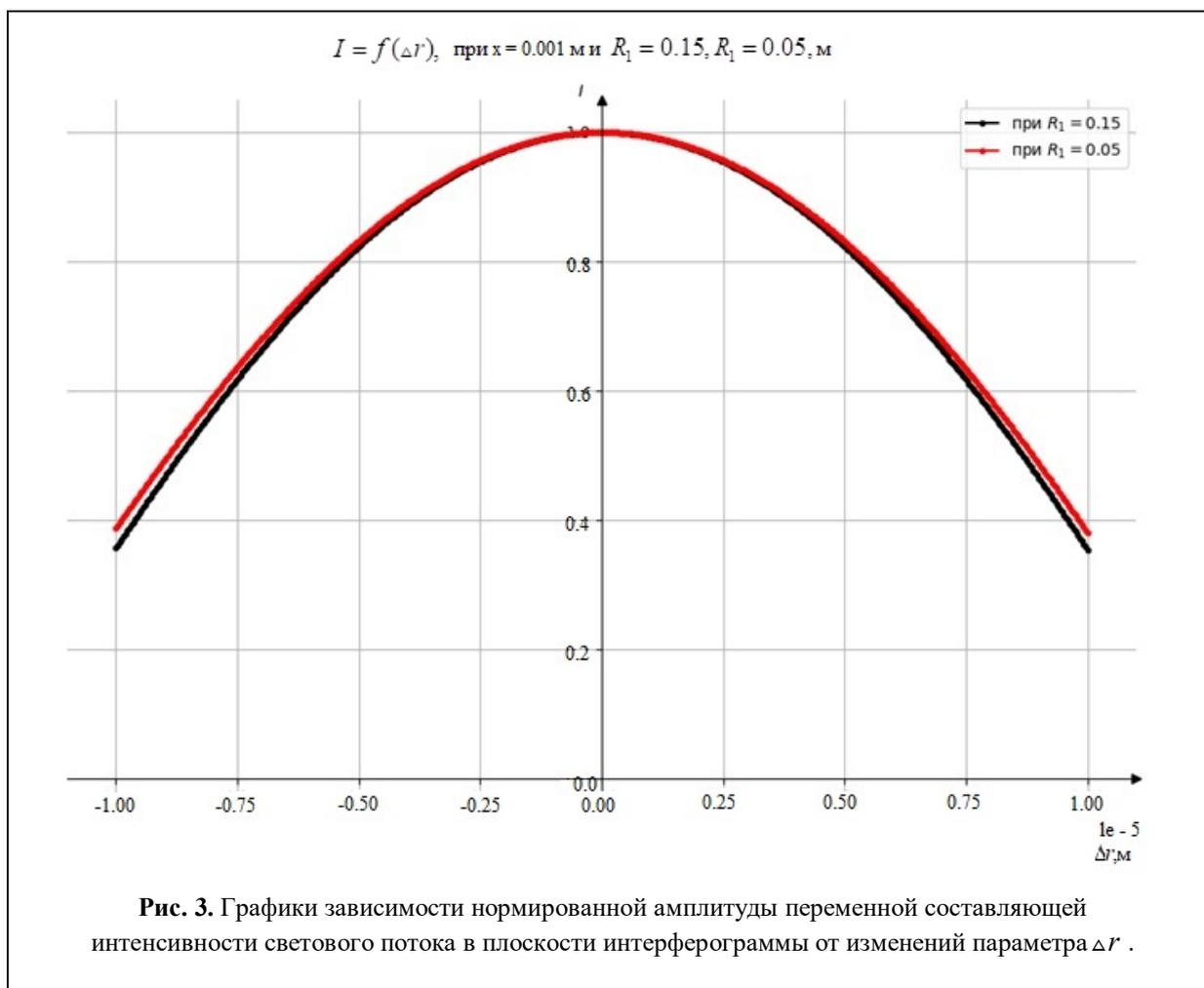
$$\cos \delta_1 = \frac{x \cos \beta - R_1 \cos(\beta - \alpha)}{R_1 - x \cos \alpha}; \quad (4)$$

$$\cos \delta_2 = \frac{x \cos \beta_2 - R_1 \cos(\beta_2 - \alpha_1 - 2\alpha)}{R_1 - x \cos(\alpha_1 + 2\alpha)}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta_2 = & (\sin(\alpha_1 - \beta) \sin(2\alpha^* + \alpha_2) - \\ & - \sin(\alpha_1 + 2\alpha) \sin(\alpha_2 - \beta)) \times \\ & \times (\sin(\alpha_1 - \beta) \cos(2\alpha^* + \alpha_2) - \\ & - \sin(\alpha_1 + 2\alpha) \sin(\alpha_2 - \beta))^{-1}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\Delta r \sin \beta + R_1 \sin \alpha_1}{\Delta r \cos \beta + R_1 \cos \alpha_1}. \quad (7)$$

Исходные данные для математического моделирования:



1. $\alpha = 1^{\circ}3'2''$; $\alpha^* = 0^{\circ}12'5''$, $\alpha_1 = 10^{\circ}$; $\beta = 90^{\circ}$, $R_1 = 0,15$ м и $R_1 = 0,05$ м; $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-6}$ м.

2. При построении графика зависимости $I_{\perp} = f(\Delta r)$ параметр Δr меняется в пределах от -10^{-6} м до $+10^{-6}$ м (в точках $x = 0$ и $x = 0,001$ м и для $R_1 = 0,15$ м и $R_1 = 0,05$ м).

3. При построении графика зависимости $x_{\max,1} = f(\Delta r)$ параметр Δr меняется в пределах от -10^{-6} м до $+10^{-6}$ м, где $x_{\max,1}$ — координата максимума интерференционной полосы нулевого порядка.

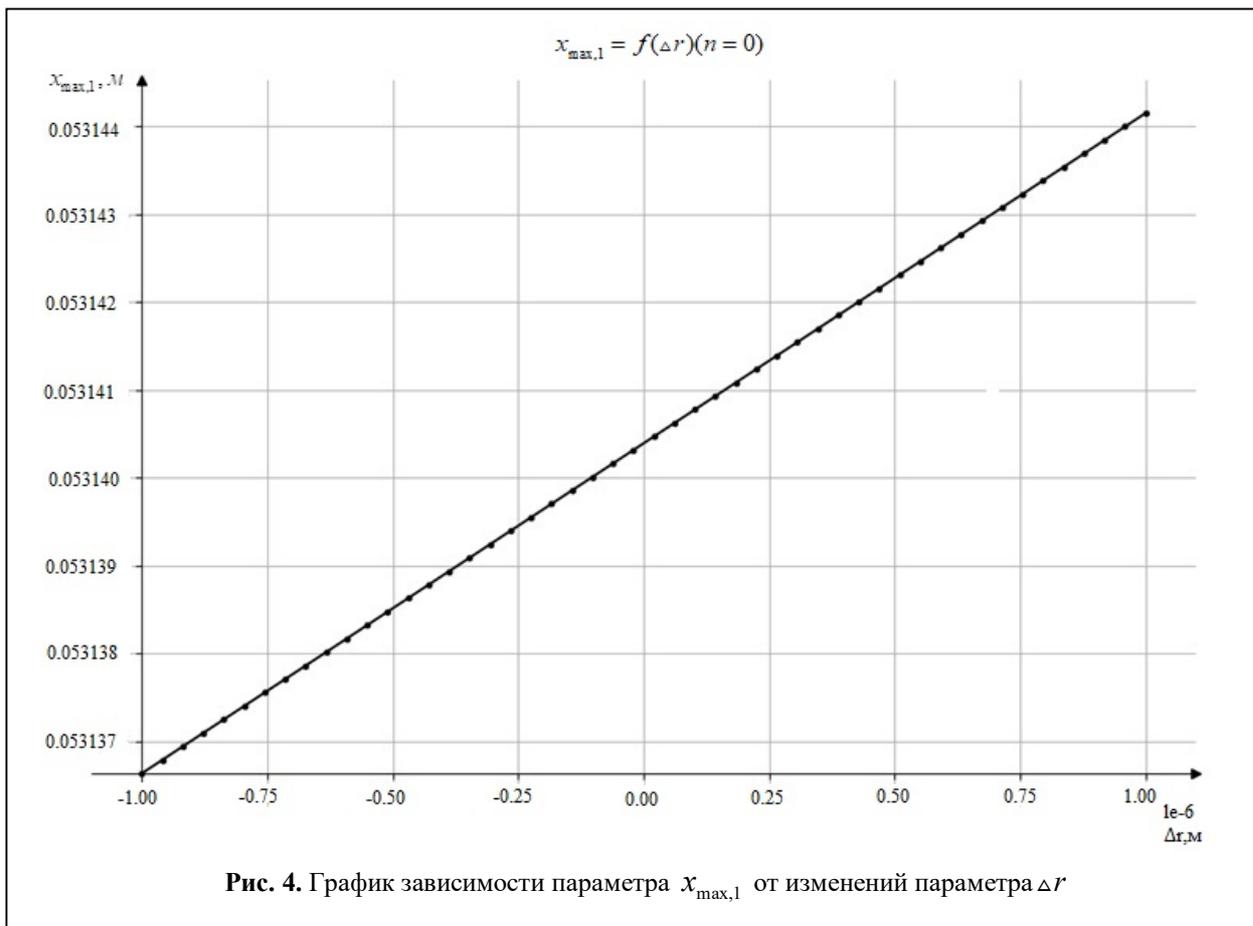
4. При построении графика зависимости $I_{\perp} = f(\beta)$ угол β меняется от 80° до 90° (график строится в точках $x = 0$ и $x = 0,001$ м).

5. При построении графических

зависимостей $I_{\perp} = f(\alpha^*)$ в точках $x = 0$ и $x = 0,001$ м угол α^* меняется в диапазоне от нуля до трёх градусов.

График зависимости нормированной амплитуды интенсивности светового потока от изменений параметра Δr в точках $x = 0$ и $x = 0,001$ м представлен на рис. 3.

Графические зависимости на рис. 3 представляют собой перевернутые параболы, симметричные относительно значения зависимости нормированной амплитуды интенсивности светового потока при $\Delta r = 0$, что соответствует неподвижному исходному состоянию действительного точечного источника светового потока, находящегося в точке P_1 (рис. 2). В диапазоне изменений параметра Δr от -10^{-5} м до



$+10^{-5}$ м для параметров $R_1 = 0,15$ м и $R_1 = 0,05$ м графические зависимости на рис. 3 практически совпадают. Анализ графиков на рис. 3 позволяет сделать вывод об исключительно высокой чувствительности параметров интерферограммы в голографической фотонной системе ЧАПЧ от пространственных перемещений фазового центра действительного точечного источника когерентного светового потока (рис. 2). Для представленных исходных данных при линейном смещении фазового центра модулируемого светового потока на величину 2,5 мкм значение переменной составляющей нормированной интенсивности светового потока в плоскости интерферограммы изменяется на 4%. Это позволяет обеспечить высокую чувствительность голографической фотонной системы ЧАПЧ к изменениям частоты выходных колебаний ПГ (рис. 1).

На рис. 4 представлен график зависимости

параметра $x_{\max,1}$ — координаты максимума интенсивности светового потока интерференционной полосы нулевого порядка, от изменений параметра Δr .

Анализ графической зависимости, представленной на рис. 4, показывает, что параметр $x_{\max,1}$ слабо зависит от изменений параметра Δr и зависимость эта является линейной. Это облегчает учёт этой зависимости при проектировании и построении схемы фотонной голографической системы ЧАПЧ.

Графики зависимости нормированной амплитуды переменной составляющей интенсивности светового потока в плоскости интерферограммы от изменений угла β в точках $x = 0$ и $x = 0,001$ м представлены на рис. 5.

Графические зависимости на рис. 5 представляют собой обрезанные слева перевёрнутые параболы. Для диапазона изменения углов

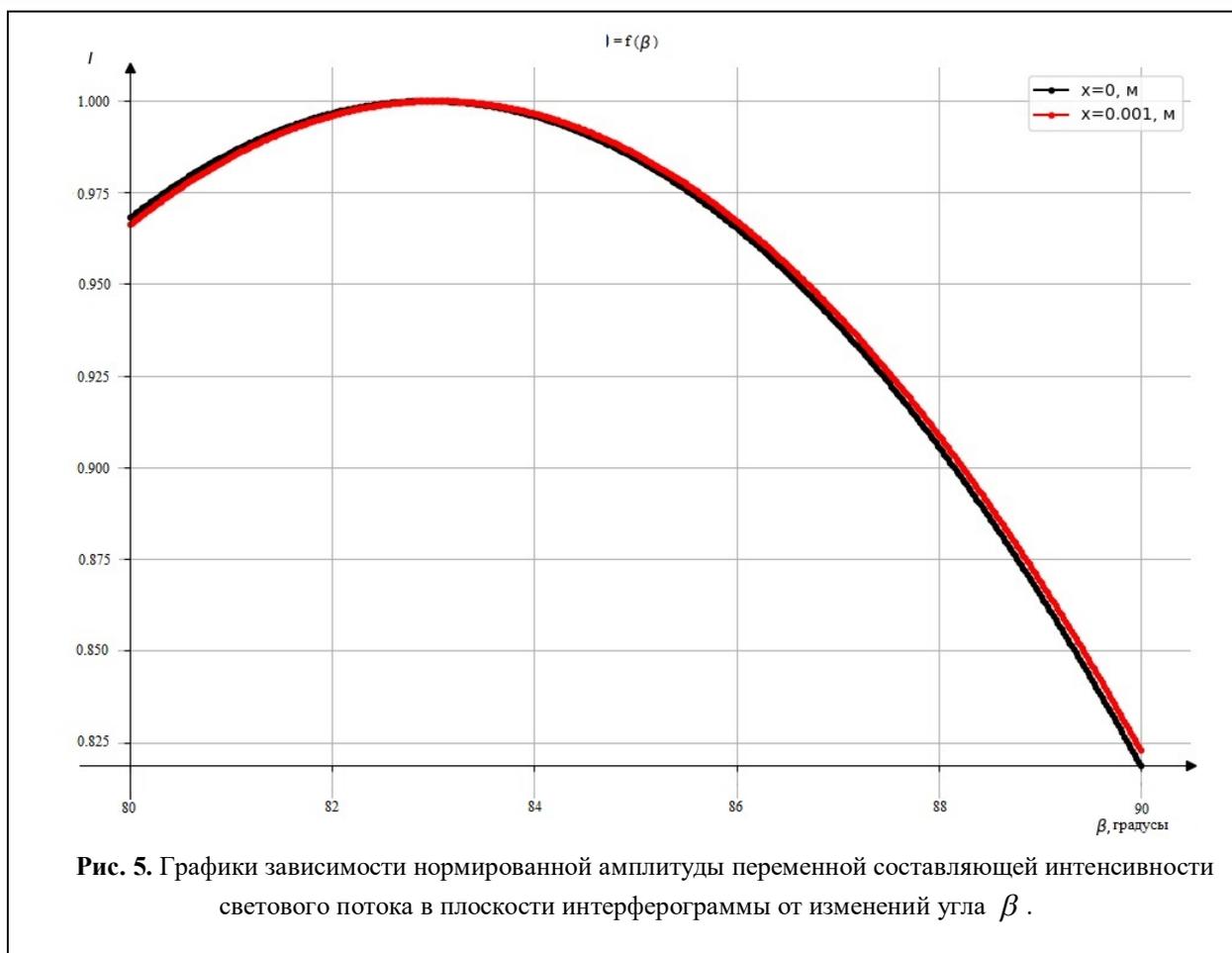


Рис. 5. Графики зависимости нормированной амплитуды переменной составляющей интенсивности светового потока в плоскости интерферограммы от изменений угла β .

β от 80° до 90° эти зависимости для точек $x = 0$ и $x = 0,001$ м практически совпадают. Анализ этих графических зависимостей показывает, что нормированная амплитуда переменной составляющей интенсивности светового потока в плоскости интерферограммы слабо зависит от изменений величины угла β . Характер изменений этой зависимости сохраняется при изменении координаты x . При этом угол β является углом между плоскостью Фурье-голограммы голографического интерферометра и направлением перемещения фазового центра модулируемого светового потока. В силу низкой чувствительности параметров интерферограммы к изменениям угла β (рис. 2) этот угол нецелесообразно использовать в качестве модулируемого параметра светового потока в голографической фотонной системе ЧАПЧ.

На рис. 6 представлены графики зависимости нормированной амплитуды переменной составляющей интенсивности светового потока в плоскости интерферограммы от изменений угла α^* в точках $x = 0$ и $x = 0,001$ м.

Графические зависимости $I = f(\alpha^*)$ в точках $x = 0$ и $x = 0,001$ м при изменении угла α^* в диапазоне от нуля до трёх градусов практически совпадают. Анализ этих графиков на рис. 6 показывает, что нормированная амплитуда переменной составляющей интенсивности светового потока в плоскости интерферограммы слабо зависит от изменений угла α^* и зависимость эта линейная. Характер изменений этой зависимости сохраняется при изменении координаты x . Из анализа графических зависимостей на рис. 6 можно сделать вывод о том, что угол α^* (рис. 2) нецелесообразно исполь-

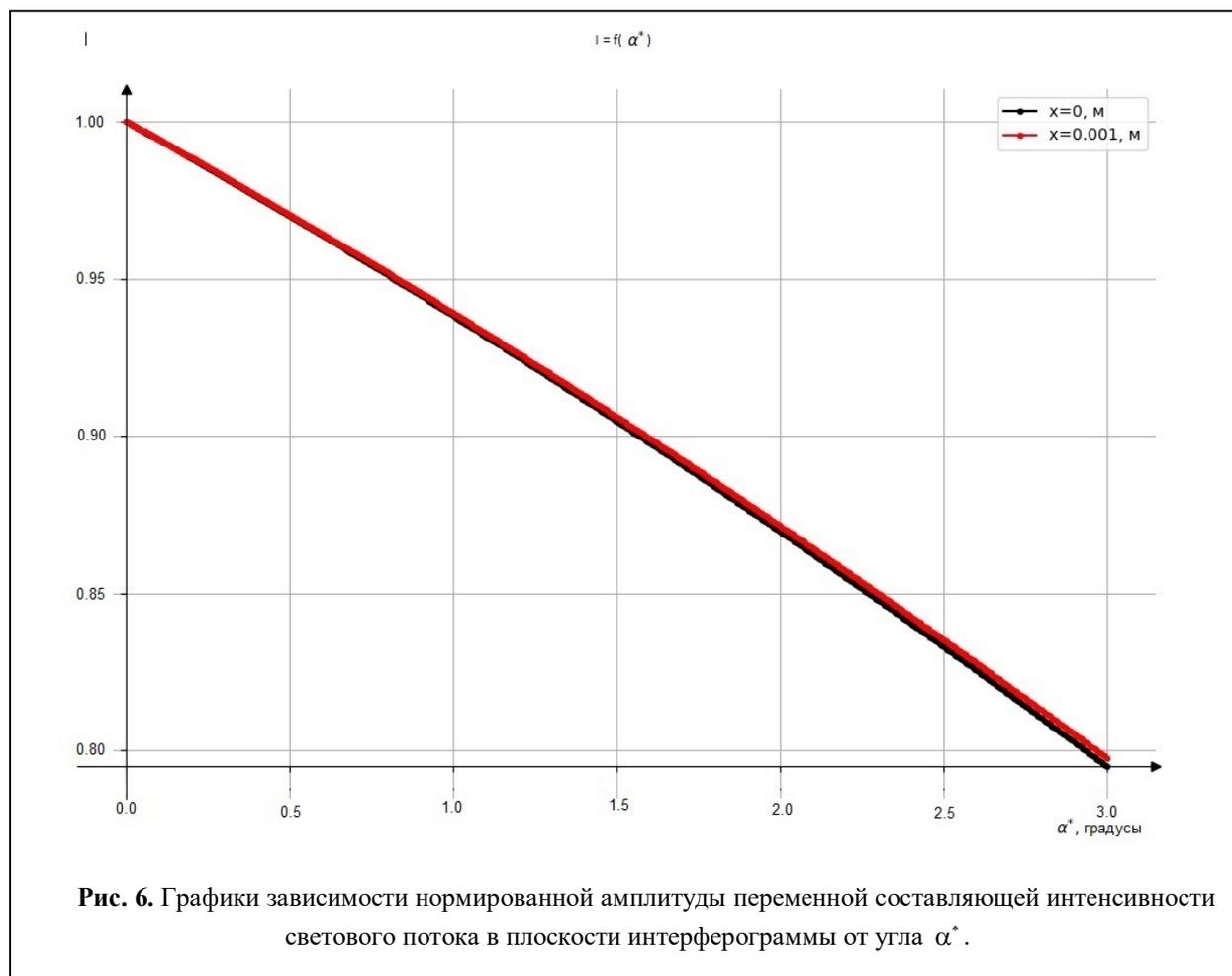


Рис. 6. Графики зависимости нормированной амплитуды переменной составляющей интенсивности светового потока в плоскости интерферограммы от угла α^* .

зывать в качестве модулируемого параметра светового потока в голографической фотонной системе ЧАПЧ. Линейность и практическое совпадение графических зависимостей на рис. 6 позволяют с высокой точностью учесть погрешность измерений в работе голографической фотонной системы ЧАПЧ, которая обусловлена возможными взаимными колебаниями объёмной отражательно-пропускающей Фурье-голограммы и плоского зеркала, т.е. колебаниями значений угла α^* .

Заключение

1. В качестве частотного дискриминатора системы частотной автоподстройки частоты может быть использован голографический интерферометр. При этом эталонное значение частоты выходных колебаний автогенератора будет определяться параметрами интерферо-

граммы. Разработан вариант структурной схемы голографической фотонной системы ЧАПЧ, обеспечивающей коррекцию частоты выходных колебаний ПГ в широком частотном диапазоне, превышающем диапазон частот захвата и удержания известных электронных систем ЧАПЧ. Схема разработанной системы ЧАПЧ обеспечивает возможность высокоточной коррекции значений частоты выходных колебаний ПГ. Точность подстройки частоты выходных колебаний ПГ разработанного варианта голографической фотонной системы ЧАПЧ будет определяться чувствительностью используемого голографического интерферометра, пространственной частотой интерференционных полос и интенсивностью светового потока в этих полосах, а также размерами отдельных микрофотоприёмников ЛФУ (рис. 1) и их чувствительностью.

2. Математические соотношения для параметров $r_0, r_0^*, r_2, r_2^*, \Delta r$ и Δr^* позволяют провести моделирование и оценить зависимость параметров интерферограммы от пространственных координат точечного источника света S_0 , которые будут определяться частотой выходных колебаний ПГ. Модулируемым параметром светового потока в голографической фотонной системе ЧАПЧ, обеспечивающим наибольшие чувствительность изменений параметров интерферограммы при изменении этого параметра и точность измерения частоты выходных колебаний ПГ является параметр Δr , представляющий собой линейные перемещения фазового центра источника модулируемого светового потока.

Литература

1. Белов Л.А. Радиотехника. Формирование стабильных частот и сигналов: учебник для бакалавриата и магистратуры. / Л. А. Белов. 2-е изд., пер. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2018. 229 с.
2. 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.
3. 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.
4. Кузнецова В.В., Назарова О.Ю., Прыгунов А.Г., Шашкин О.В. Голографическое детектирова-

ние оптического излучения с угловой модуляцией. // Материалы III международной научно-практической конференции «Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем», г. Елец. 2019. Часть I. С. 40–43

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

6. Прыгунов А.Г. Физические основы использования голографического интерферометра в фотонных телекоммуникационных устройствах // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2021. №2. С. 42–48.

7. Прыгунов А.Г. Основы использования объёмных отражательных голограмм в устройствах радиофотоники // Электросвязь, 2021. №8. С. 54–59.

8. Безуглов Д.А., Прыгунов А.Г., Трещачев В. В. Анализ дифракции света на эталонной голограмме при измерении перемещений объектов пространственно-спектральным методом // Автометрия. 1998. №5. С. 21–28.

9. Сидоров А.И. Основы фотоники: физические принципы и методы преобразования оптических сигналов в устройствах фотоники. Учебное пособие. СПб.: ФГБОУ ВПО «СПб НИУ ИТМО», 2014. 148 с.

10. Радиотехнические системы: Учеб. для вузов по спец. "Радиотехника"/ Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др.; Под ред. Ю.М. Казаринова. М.: Высшая школа, 1990. 496 с.

11. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978. 112 с.

12. Ребрин Ю.К. Управление оптическим лучом в пространстве. М.: Сов. радио, 1977. 336 с.

Поступила 7 марта 2022 г.

English

HOLOGRAPHIC PHOTONIC SYSTEM OF AUTOMATIC FREQUENCY CONTROL FOR EQUIPMENT OF ADVANCED TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Olga Yuryevna Nazarova — PhD, Associate Professor, Radio Engineering Department, Don State Technical University¹.

E-mail: olga2018rostov@yandex.ru

Alexander Germanovich Prygunov — PhD, Associate Professor, Radio Engineering Department, Don State Technical University¹.

E-mail: agprygunov@mail.ru

Anna Nikolayevna Shilina — PhD, Associate Professor, Military Training Center, South-Russian state Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platov².

E-mail: kurnevakatya@mail.ru

¹Address: 344000, Russian Federation, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1.

²Address: 346428, Russian Federation, Rostov region, Novocherkassk, Prosveshcheniya st., 132.

Abstract: There must be sources of highly stable electrical oscillations for the equipment operation to generate, transmit, receive and process signals in radio and telecommunication systems, regardless of their purpose, and they should ensure the functioning of these systems with desired technical features. Electronic frequency synthesizers are applied as such sources of highly stable oscillations comprising highly stable reference-frequency generators. Such electronic systems as FLL (frequency-locked loop) and PLL (phase-locked loop) are used in self-contained generator to enhance frequency stability of output oscillations in electronic generating equipment. Most commonly, FLL and PLL have combined application. FLL benefit is its good filtering properties. However, this system has an essential drawback and that is post-tuning drift. This fact makes FLL an inapplicable in frequency synthesizers as the primary frequency stabilizing system for their output oscillations. Besides FLL has a significant drawback in terms of limited locking and retention frequencies. The task of bandspreading frequencies of FLL locking and retaining frequencies, as well as reducing the level of post-tuning drift can be solved by constructing this system design using holographic photonic elements. The technology for constructing FLL holographic photonic system is implemented through modulation of coherent light flux by enhanced output oscillations of tunable generator using curvature of its wavefront as modulated parameters of this light flux. The light flux modulated like that falls on volumetric reflective and transmitting Fourier hologram of holographic interferometer. That said, the holographic interferometer forms an interferogram, the instantaneous value and the parameters of which explicitly conform to frequency specific value of the tunable generator. Then, the nature of change in spatial-spectral intensity distribution of optical field in plane of the formed interferogram will univocally conform to instantaneous values' changes in amplitude, frequency and phase of TG (tunable generator) output oscillations.

Keywords: telecommunication systems, frequency stability, automatic frequency control, photonics, holography, measurement sensitivity, interferogram parameters.

References

1. *Belov L. A.* Radioelectronics. Formation of stable frequencies and signals: a textbook for undergraduate and graduate studies. 2nd ed., trans. and add. Moscow: Yurayt Publishing House, 2018. 229 p.
2. *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.
3. *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.
4. *Kuznetsova V.V., Nazarova O.Yu., Shashkin O.V.* Holographic detection of optical radiation with angular modulation. Materials of the III International Scientific and Practical Conference "Fundamental and applied problems of safety, survivability, reliability, stability and efficiency of systems", Yelets, 2019. Part 1. Pp. 40–43
5. *P. Hariharan.* Optical Holography, principles, techniques and applications. Second edition, Cambridge University Press, 2013. 424 p.
6. *Prygunov A.G.* Physical foundations of the use of a holographic interferometer in photonic telecommunication devices. Radioengineering and telecommunications system, 2021. No. 2. Pp. 42–48.
7. *Prygunov A.G.* fundamentals of the use of volumetric reflective holograms in radiophotonics devices. *Electrosvyaz*. 2021. No. 8. Pp. 54–59.
8. *Bezuglov D.A., Prygunov A.G., Trepachev V. V.* Analysis of light diffraction on a reference hologram when measuring the movements of objects by the spatial-spectral method. *Avtometriya*, 1998. No. 5. Pp. 21–28.
9. *Sidorov A.I.* Fundamentals of photonics: physical principles and methods of optical signal conversion in photonics devices. Study guide. St. Petersburg: FGBOU VPO "SPB NIU ITMO", 2014, 148 p.
10. Radio engineering systems: textbook for universities in the specialty "Radio engineering". *Yu.P. Grishin, V.P. Ipatov, Yu.M. Kazarinov, etc.; Edited by Yu.M. Kazarinov.* Moscow: Vyshaya shkola, 1990. 496 p.
11. *Magdich L.N., Molchanov V.Ja.* Acousto-optic devices and their application. Moscow: Sov. radio, 1978. 112 p.
12. *Rebrin Yu. K.* Optical beam control in space. Moscow: Sov. radio, 1977. 336 p.