

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.12>

УДК: УДК: 535.4(076.5)

## ПРИНЦИП ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ В ФОТОННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЪЁМНЫХ ФУРЬЕ-ГОЛОГРАММ

А.Г. Прыгунов

Донской государственный технический университет  
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Статья поступила в редакцию 8 ноября 2023 г.

**Аннотация.** Показана актуальность перехода к новой элементной базе для построения телекоммуникационных систем и устройств с улучшенными техническими характеристиками на основе технологий фотоники и, в том числе, голографической фотоники. Для улучшения технических характеристик и расширения функциональных возможностей аппаратуры телекоммуникационных систем при построении их конструкций предложено использовать объёмные Фурье-голограммы. Сформулирован принцип преобразования информационных параметров электрических сигналов в фотонном телекоммуникационном устройстве с объёмной Фурье-голограммой в соответствующие им параметры голографической интерферограммы и разработана структурная схема этого принципа. Указано, что для практического использования принципа электрооптического преобразования сигналов в фотонных телекоммуникационных устройствах с оптическими модуляторами и объёмными Фурье-голограммами в их конструкции каждый этап реализации этого принципа необходимо рассматривать в качестве отдельной задачи. Описано функциональное назначение отдельных элементов структурной схемы принципа преобразования. Показаны возможные методы модуляции параметров

светового потока в фотонном телекоммуникационном устройстве с объёмной Фурье-голограммой. Представлены варианты структурных схем голографических фотонных устройств с отражательной и отражательно-пропускающей Фурье голограммами соответственно. Приведены математические соотношения, определяющие характер распределения интенсивности светового потока на интерферограмме, формируемой в плоскости объёмной Фурье-голограммы. Рассмотрено влияние объёмной Фурье-голограммы на параметры когерентного светового потока. Отмечено, что голографическая интерферограмма, сформированная в плоскости объёмной Фурье-голограммы, проецируется в прожекторную зону с сохранением амплитудно-фазовых соотношений между интерферирующими световыми потоками, но с изменением масштаба проецируемой интерферограммы. Разработаны рекомендации по использованию принципа преобразования сигналов в фотонных телекоммуникационных устройствах с использованием объёмных Фурье-голограмм. Поясняется влияние электрооптического и акустооптического модуляторов когерентного светового потока со сферическим волновым фронтом на положение его фазового центра. Указано, что чувствительность параметров голографической интерферограммы к изменениям напряжения модулирующего электрического сигнала можно регулировать, изменяя параметры элементов оптической схемы голографического фотонного телекоммуникационного устройства и условия записи объёмной Фурье-голограммы. Сделан обоснованный вывод о целесообразности построения фотонных телекоммуникационных устройств с использованием оптических модуляторов светового потока в сочетании с объёмными Фурье-голограммами.

**Ключевые слова:** фотоника, телекоммуникационные устройства, принцип преобразования, схема принципа, модуляция, объёмная Фурье-голограмма, интерферограмма.

**Финансирование:** работа подготовлена в рамках научной темы «Разработка беспилотных технологий на основе комплексной поэтапной оптимизации с

редукцией экстремальных задач и инструментов нейро-нечёткого моделирования (FZNE-202 2-0006)».

**Автор для переписки:** Прыгунов Александр Германович, [agprygunov@mail.ru](mailto:agprygunov@mail.ru)

## **Введение**

В работах [1, 2] показана актуальность перехода к новой элементной базе для построения телекоммуникационных систем и устройств на основе технологий фотоники. Фотоника представляет собой перспективное направление в развитии телекоммуникационной элементной базы и, в настоящее время, активно развивается [1-5]. Использование фотоники позволяет расширить функциональные возможности телекоммуникационной аппаратуры, существенным образом улучшить её технические и эксплуатационные характеристики [1-5]. Одним из направлений фотоники является голографическая фотоника. Конструктивным элементом любого устройства голографической фотоники является голограмма того или иного типа. При этом, в зависимости от функционального назначения, могут быть использованы как тонкослойные, так и толстослойные (объёмные) голограммы отражательного или отражательно-пропускающего типа. Независимо от их функционального назначения, в конструкциях всех голографических фотонных устройств используется электро-оптическое преобразование сигналов. В процессе такого преобразования обеспечивают взаимодействие с голограммой информационного светового потока, модулированного электрическим сигналом. В работах [3-6] рассмотрены физические основы и особенности использования объёмных Фурье-голограмм для улучшения технических характеристик и расширения функциональных возможностей аппаратуры телекоммуникационных систем. Голограммы такого типа могут быть использованы для построения широкого перечня фотонных телекоммуникационных устройств и систем с улучшенными техническими характеристиками [7-9]. Особенностью работы таких устройств является формирование в них информационных голографических интерферограмм. При этом практический интерес представляют собой процесс

формирования информационной голографической интерферограммы и влияние Фурье-голограммы в конструкции фотонного устройства на параметры падающего на неё светового потока.

Целью статьи является разработка принципа электрооптического преобразования сигналов в фотонных телекоммуникационных устройствах с использованием объёмных Фурье-голограмм.

Решаемые задачи:

- 1) Построение и описание структурной схемы принципа электрооптического преобразования сигналов в фотонном телекоммуникационном устройстве с использованием объёмной Фурье-голограммы.
- 2) Анализ влияния объёмной Фурье-голограммы на параметры когерентного светового потока.
- 3) Разработка рекомендаций по технической реализации принципа электрооптического преобразования сигналов в фотонном телекоммуникационном устройстве с использованием объёмной Фурье-голограммы.

## **1. Построение и описание структурной схемы принципа электрооптического преобразования сигналов в фотонном телекоммуникационном устройстве с использованием объёмной Фурье-голограммы.**

Для построения и описания структурной схемы принципа преобразования сигналов в фотонном телекоммуникационном устройстве с использованием объёмной Фурье-голограммы необходимо его сформулировать.

*Принцип электрооптического преобразования сигналов в фотонном телекоммуникационном устройстве с объёмной Фурье-голограммой заключается в модуляции электрическим сигналом когерентного светового потока со сферическим волновым фронтом, формировании интерферограммы в плоскости объёмной Фурье-голограммы и регистрации*

*параметров сформированной интерферограммы, однозначно связанных с информационными параметрами электрического модулирующего сигнала.*

Структурная схема принципа преобразования сигналов в фотонном телекоммуникационном устройстве с использованием оптического модулятора и объёмной Фурье-голограммы представлена на рисунке 1 в виде схемы взаимосвязи параметров электрического и модулированного им оптического сигнала с параметрами интерферограммы, формируемой в фотонном устройстве в плоскости объёмной Фурье-голограммы.

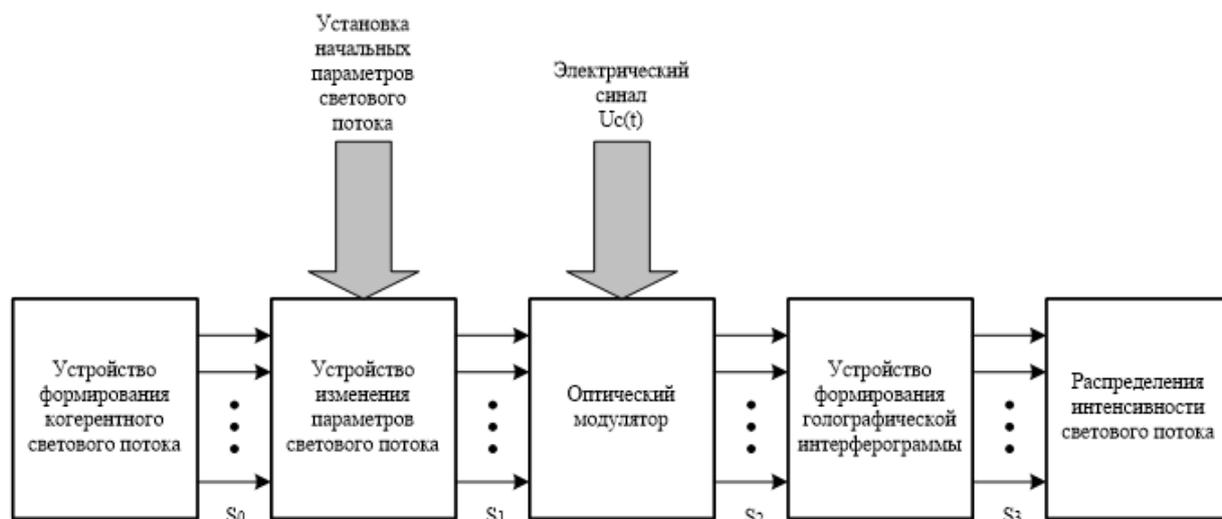


Рис. 1. Структурная схема принципа преобразования сигналов с использованием оптического модулятора и объёмной Фурье-голограммы.

Для практического использования принципа электрооптического преобразования сигналов в фотонном телекоммуникационном устройстве с оптическим модулятором и объёмной Фурье-голограммой в его конструкции каждый этап реализации этого принципа необходимо рассматривать в качестве отдельной задачи. В структурной схеме, представленной на рисунке 1, в качестве устройства формирования когерентного светового потока могут быть использованы лазерные излучатели. В устройстве изменения параметров светового потока формируется световой пучок с требуемыми диаметром, кривизной волнового фронта и направлением его распространения. Оптический модулятор обеспечивает модуляцию электрическим сигналом частоты, мгновенной фазы или пространственного положения фазового центра (точки фокусировки) когерентного светового потока, падающего на объёмную

Фурье-голограмму, в соответствии с изменением информационных параметров электрического сигнала. Известны [10-12] прямая и внешняя модуляции оптического излучения. Для технической реализации фотонного телекоммуникационного устройства с объёмной Фурье-голограммой возможно использование как прямой, так и внешней модуляции. Сравнивая технические характеристики систем с этими видами модуляции оптического излучения для их использования в конструкциях фотонных устройств можно отметить преимущества систем с внешней модуляцией [10]: повышенная скорость модуляции оптической несущей, расширенный спектр модулирующего сигнала, большая практичность в технической реализации и ряд других преимуществ. При построении конструкций голографических телекоммуникационных фотонных устройств с объёмными Фурье-голограммами используются, как правило, когерентные световые потоки, имеющие сферические волновые фронты [7-9]. Для преобразования информационных параметров электрического сигнала в изменения значений частоты, мгновенной фазы или направления распространения когерентного светового потока, имеющего сферический волновой фронт, могут быть использованы внешние оптические модуляторы, выпускаемые современной промышленностью: электрооптический (ЭОМ) [10-12], акустооптический (АОМ) [10-13], а также модуляторы с использованием пьезоэффекта [11, 14]. В плоскости объёмной Фурье-голограммы голографического фотонного телекоммуникационного устройства двумя когерентными световыми потоками формируется голографическая интерферограмма. При использовании в фотонном устройстве объёмной отражательной Фурье-голограммы (ООФГ) эти световые потоки падают на Фурье-голограмму с одной её стороны. В случае использования объёмной отражательно-пропускающей Фурье-голограммы (ОПФГ) интерференционная картина в её плоскости формируется в результате интерференции двух встречных световых потоков. Один из этих световых потоков формируется действительным точечным источником света, а второй – мнимым, формируемым из первого с помощью отражателя [3, 15]. При этом Фурье-голограмма и

размещённый за ней отражатель образуют голографический интерферометр. Распределение интенсивности оптического поля в плоскости интерференции однозначным образом определяется оптической разностью хода лучей интерферирующих световых потоков в каждой точке интерферограммы. Изменение этой разности хода путём модуляции параметров того или иного из интерферирующих световых потоков определяет однозначно соответствующее этой модуляции изменение параметров голографической интерферограммы.

На рисунке 2 показан вариант структурной схемы голографического фотонного устройства с использованием ЭОМ и объёмной отражательной Фурье-голограммы. Используются следующие обозначения: л – лазер; СД1 и СД2 – первый и второй светоделители; ОС1 и ОС2 – первая и вторая оптические системы; М – электрооптический модулятор; ПЗ1 и ПЗ2 – первое и второе поворотные зеркала; Г – объёмная отражательная Фурье-голограмма; ФПУ – фотоприёмное устройство;  $U_{\text{упр1}}$  - электрическое управляющее напряжение, подаваемое на вход лазера для управления частотой его оптического излучения;  $U_{\text{упр2}}$  - электрическое управляющее напряжение, подаваемое на электроды ЭОМ для модуляции фазы светового потока.

Характер распределения интенсивности светового потока в плоскости интерференции (в плоскости Фурье-голограммы Г) однозначно определяется разностью фаз интерферирующих световых потоков, которая определяется в каждый момент времени их мгновенными фазами в каждой из точек плоскости интерферограммы. Изменение этой разности фаз в соответствии с изменением информационных параметров электрического сигнала, модулирующего сигнальный световой поток, обуславливает однозначно соответствующее этому изменение параметров интерферограммы. Модуляция светового потока может быть выполнена напряжением либо  $U_{\text{упр1}}$ , либо  $U_{\text{упр2}}$ . Чувствительность параметров интерферограммы по уровню противофазности интерферирующих световых потоков соответствует пространственному перемещению фазового центра (точки фокусировки) модулируемого светового потока со сферическим

волновыми фронтом на расстояние порядка  $10^{-7}$  м [3, 7]. С учётом возможностей современных ФПУ по регистрации уровня интенсивности светового потока в плоскости интерференции чувствительность измерений будет соответствовать перемещениям его фазового центра на расстояние порядка  $10^{-9} \div 10^{-10}$  м.

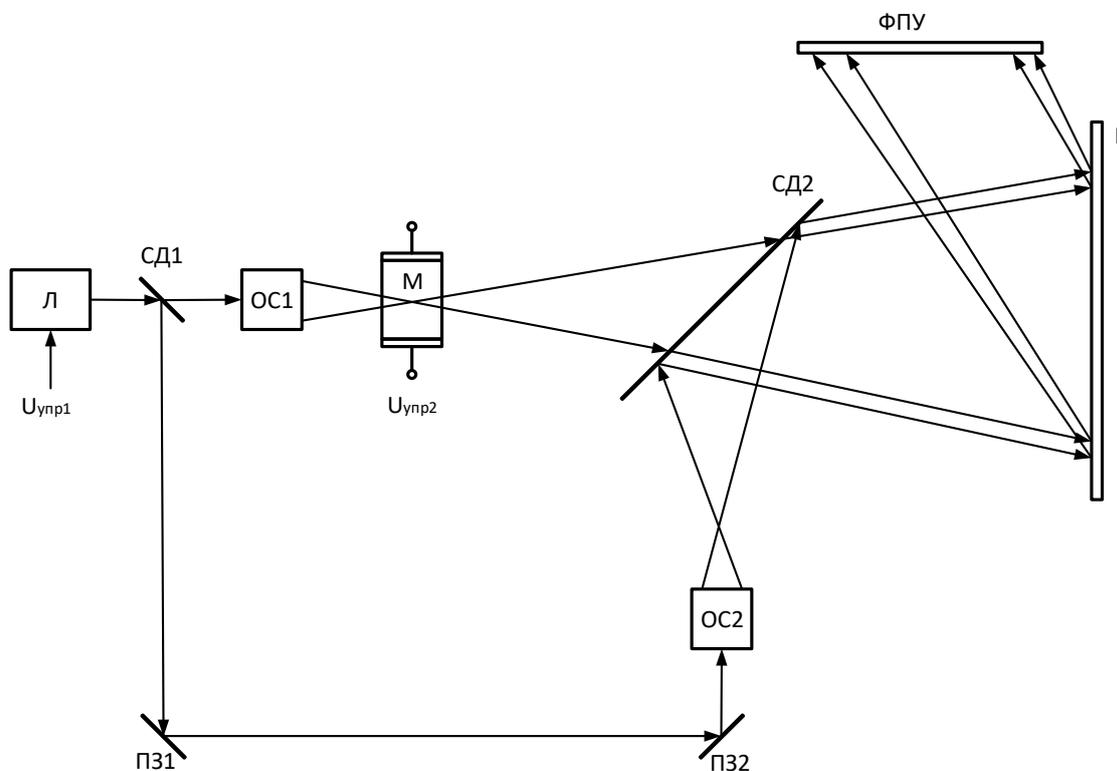


Рис. 2. Вариант структурной схемы голографического фотонного устройства с использованием ЭОМ и объёмной отражательной Фурье-голограммы.

В схемах фотонных устройств Фурье-голограмма обеспечивает канализацию энергии оптического поля в центральной области голографической интерферограммы [5, 15] и проецирует сформированную интерферограмму в сторону от Фурье-голограммы. При этом обеспечивается возможность формирования интерферограммы при использовании источников оптического излучения с пониженной когерентностью формируемого ими светового потока [5, 6]. Это обусловлено свойствами пространственной и спектральной избирательностью объёмной голограммы к падающему на неё световому потоку [5, 6]. При технической реализации голографического фотонного телекоммуникационного устройства с использованием в его конструкции

объёмной Фурье-голограммы обеспечивается расширение динамического и частотного диапазонов его работы [4, 5].

На рисунке 3 показан вариант структурной схемы голографического тракта формирования управляющего сигнала в системе автоматической регулировки усиления (АРУ) с голографическим интерферометром на основе ОПФГ [9] в его конструкции и с модуляцией источника мнимого (сформированного плоским отражателем) светового потока путём использования оптического модулятора на основе пьезоэффекта.

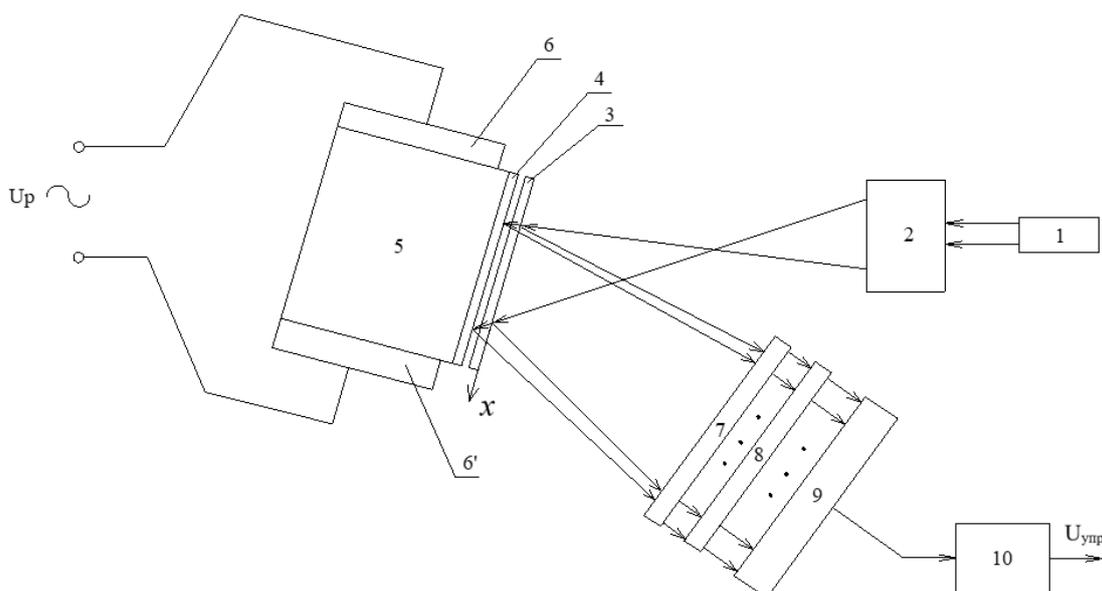


Рис. 3. Структурная схема голографического тракта формирования управляющего сигнала системы автоматической регулировки усиления.

Использованы следующие обозначения: 1 – лазер; 2 – оптическая система; 3 – объёмная ОПФГ; 4 – плоский отражатель; 5 – пьезоэлемент; 6, 6' – электроды; 7 – линейка фотоприёмных устройств (ЛФПУ); 8 – линейка пороговых устройств (ЛПУ); 9 – решающее устройство; 10 – устройство выработки управляющего сигнала;  $U_{упр}$  – управляющий сигнал, подаваемый на регулируемый усилительный каскад;  $U_p$  – напряжение с выхода регулируемого усилительного каскада.

Работа голографического фотонного устройства, структурная схема которого представлена на рисунке 3, состоит в формировании интерферограммы в плоскости ОПФГ 3, проецировании её в плоскость ЛФПУ 7 с последующим

измерением и анализом её параметров. Распределение интенсивности светового потока в плоскости интерферограммы однозначно определяется пространственным положением плоского отражателя 4 относительно плоскости ОПФГ 3, которое зависит от величины напряжения  $U_p$ , подаваемого на электроды 6, 6' пьезоэлемента 5. Изменение значения напряжения  $U_p$  вызывает соответствующее этому линейное перемещение плоского отражателя 4, что приводит к пространственному перемещению фазового центра мнимого светового потока, падающего на этот плоский отражатель 4 от оптической системы 2. Двумя встречными световыми потоками в плоскости ОПФГ 3 формируется голографическая интерферограмма. При изменении значения  $U_p$  изменяются параметры этой интерферограммы, которые фиксируются ЛФПУ 7 и передаются на входы ЛПУ 8. На основе сигналов с выходов ЛПУ 8 в решающем устройстве 9 формируется закон управления в системе АРУ. По сравнению с электронными аналогами голографическая радиофотонная система АРУ обеспечивает расширение динамического диапазона её работы и рабочей полосы частот. Чувствительность параметров голографической интерферограммы по уровню противофазности интерферирующих световых потоков в её центре соответствует пространственному перемещению плоского отражателя 4 голографического интерферометра на расстояние, равное  $\lambda/4$ , где  $\lambda$  – длина волны света [3, 5].

Принцип электрооптического преобразования сигналов в фотонных телекоммуникационных устройствах с использованием объёмных Фурье-голограмм не зависит от используемого метода модуляции и вида объёмной Фурье-голограммы (ООФГ или ОПФГ). Для оценки технических характеристик и анализа работы фотонного телекоммуникационного устройства с объёмной Фурье-голограммой необходимо знать характер влияния этой голограммы на параметры когерентного светового потока.

## 2. Анализ влияния объёмной Фурье-голограммы на параметры когерентного светового потока.

Известно [15], что при дифракции когерентного светового потока на объёмной Фурье-голограмме обеспечивается канализация его энергии в заданной области пространства. При этом реализуются частотная и пространственная селекция светового потока и обеспечивается высокая чувствительность параметров интерферограммы к изменениям его частоты, фазы и направления распространения [3-6].

Для ООФГ выражение для распределения интенсивности светового потока описывается выражением [4]:

$$I = I_0 + I_1 \cos[k(r_c - r_{оп})], \quad (1)$$

где  $r_c$  – расстояние между фазовым центром сигнального светового потока и произвольной точкой  $P$  в плоскости ООФГ;  $r_{оп}$  – расстояние между фазовым центром опорного светового потока и произвольной точкой  $P$  в плоскости ООФГ;  $I_0$  – интенсивность постоянного светового фона;  $I_1$  – интенсивность переменной составляющей светового потока в плоскости интерференции.

Известно [6], что объёмная Фурье-голограмма обладает свойствами частотной и пространственной избирательности к световому потоку. Условием полной реконструкции оптического поля, экспонированного на объёмной голограмме, является кратность оптической разности хода  $\Delta$  лучей света, отражённых системой страт голограммы, длине волны света  $\lambda$  [5, 6]:

$$\Delta = \lambda m, \quad (2)$$

где  $m$  – целое число.

Расстояние  $h$  между стратами в направлении хода луча света должно быть:

$$h = \frac{\rho\lambda}{2}, \quad (3)$$

где параметр  $\rho$  является целым числом и имеет физический смысл номера страты в эмульсии голограммы.

В случае, если

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (4)$$

наблюдается полная деструкция оптического поля, экспонированного на ООФГ [5, 6].

При проецировании интерферограммы, сформированной в плоскости объёмной Фурье-голограммы, в прожекторную зону сохраняются амплитудно-фазовые соотношения между интерферирующими световыми потоками, однако изменяется масштаб проецируемой интерферограммы, который обусловлен параметрами реконструирующего светового потока и оптической схемы экспонирования объёмной Фурье-голограммы, пространственным положением прожекторной зоны, а также толщиной и оптической плотностью эмульсии используемой Фурье-голограммы. При дифракции света от объёмной Фурье-голограммы распределение интенсивности светового потока в прожекторной зоне представляет собой набор тёмных и светлых полос света кольцевой формы [3, 15]. При этом основная часть энергии светового потока первого порядка дифракции будет сосредоточена вблизи его оптической оси [15].

Физическими свойствами, присущими ООФГ, обладает и ОПФГ, но с учётом дифракции от такой Фурье-голограммы только части энергии падающего на неё светового потока. В конструкции фотонного устройства ОПФГ используется как часть голографического интерферометра и выражение для интенсивности светового потока  $I_{\Sigma}$  в плоскости голографической интерферограммы, имеет вид [3, 15]:

$$I_{\Sigma} = I_0 + I_1 \cos \left[ (r_1 - r_1^*) - (r_2 - r_2^*) \right], \quad (5)$$

где  $I_0$  – интенсивность постоянного светового фона;  $I_1$  – интенсивность света в интерференционных полосах;  $r_1$  – расстояние при записи Фурье-голограммы между голографической фотопластинкой и фазовым центром падающего на неё светового потока со стороны оптического излучателя при экспонировании голограммы;  $r_1^*$  – расстояние между фазовым центром мнимого светового потока, падающего на голографическую фотопластинку при записи Фурье-

голограммы;  $r_2$  – расстояние между фазовым центром светового потока, падающего на ОПФГ со стороны оптического излучателя, и плоскостью ОПФГ после перемещения в пространстве этого фазового центра относительно плоскости ОПФГ;  $r_2^*$  – расстояние от фазового центра мнимого светового потока до плоскости ОПФГ после перемещения в пространстве этого фазового центра;  $k$  – волновое число.

Аналогично голографической интерферограмме, формируемой в плоскости ООФГ, голографическая интерферограмма, формируемая в плоскости ОПФГ, проецируется в прожекторную зону за пределы объёмной Фурье-голограммы с изменением масштаба проецируемой интерферограммы.

Анализ выражения (5) показывает, что в качестве объекта модуляции могут быть использованы оба световых потока, формирующих голографическую интерферограмму.

### **3. Рекомендации по технической реализации принципа электрооптического преобразования сигналов в фотонных телекоммуникационных устройствах с использованием объёмных Фурье-голограмм.**

Современной промышленностью выпускается широкий перечень лазерных излучателей, формирующих когерентный или квазикогерентный световой поток. Выбор того или иного типа оптического излучателя для схемы голографического фотонного устройства в каждом конкретном случае полностью определяется техническими требованиями к устройству, которое необходимо разработать. Кривизна волнового фронта светового пучка, его ширина и угол падения на объёмную Фурье-голограмму задаются оптическими конструктивными элементами в виде линз, коллиматоров или объективов. Выбор того или иного метода модуляции определяется требованиями к фотонному устройству. При построении конструкции голографического фотонного устройства в качестве модулируемых информативных параметров когерентного светового потока со сферическим волновым фронтом могут быть использованы его частота, фаза, пространственное положение его фазового центра и направление его падения на Фурье-голограмму. Для модуляции фазы

сигнального светового потока со сферическим волновым фронтом в качестве оптического модулятора необходимо использовать устройство с внешней модуляцией оптического излучения [10-13]. При использовании такого оптического модулятора распределение интенсивности оптического поля в плоскости формируемой голографической интерферограммы будет изменяться однозначно в соответствии с изменениями значений модулирующего информационного электрического сигнала.

Внешние модуляторы светового потока, наиболее широко используемые в настоящее время, основаны, как правило, на линейном поперечном электрооптическом эффекте Поккельса [10-12]. В качестве электрооптического материала в таких модуляторах используется преимущественно ниобат лития ( $LiNbO_3$ ) [10]. Для светового потока, имеющего сферический волновой фронт, при прохождении его через ЭОК модулятора в соответствии с изменениями уровня модулирующего электрического напряжения  $U_c(t)$  будет изменяться кривизна волнового фронта светового потока (набег его фазы в плоскости Фурье-голограммы), что обуславливается изменениями пространственного положения фазового центра этого светового потока (точки его фокусировки).

При использовании акустооптического модулятора (АОМ) положение фазового центра модулируемого светового потока со сферическим волновым фронтом будет изменяться в пространстве в результате его акустооптического преобразования (дифракционного или рефракционного) [11-13]. В зависимости от конструкции АОМ возможны стоячая и бегущая акустические волны. Особенностью дифракции света на движущейся фазовой акустической дифракционной решётке является появление доплеровского сдвига частоты света  $\Delta\omega$  [11, 12]:

$$\Delta\omega = 2\omega V \cdot \sin\theta \cdot n/c, \quad (6)$$

где  $\omega$  – круговая частота световой волны;  $V$  – скорость звука;  $c$  – скорость света;  $\theta$  – угол падения света на звуковую волну;  $n$  – показатель преломления акустооптического материала.

Особенностью АОМ со стоячей акустической волной [11-13] является периодическое смещение фазовой дифракционной решётки в оптически прозрачном материале на величину  $\Lambda/2$ , где  $\Lambda$  – длина акустической волны.

При модуляции когерентных световых потоков с использованием пьезоэффекта обеспечивается возможность изменять параметры информационной интерферограммы в строгом соответствии с положением в пространстве относительно плоскости объёмной Фурье-голограммы фазовых центров любого из двух интерферирующих световых потоков.

Этап формирования интерферограммы в фотонных устройствах с ООФГ и ОПФГ имеет отличия. В голографическом фотонном устройстве с ООФГ для формирования интерференционной картины помимо сигнального светового пучка, модулированного электрическим сигналом, необходимо формировать и использовать отдельный опорный световой пучок, когерентный сигнальному. При этом сигнальный и опорный световые пучки должны быть узкими. При использовании ОПФГ интерферограмма формируется во встречных световых пучках [3]. При этом один из интерферирующих световых пучков формируется, как зеркальное отражение другого.

Как следует из соотношений (1) и (5), интерференционная картина в плоскости объёмной Фурье-голограммы определяется функцией косинуса. Это значит, что максимальная чувствительность к изменениям уровня переменной составляющей интенсивности светового потока в плоскости интерференции при измерениях наблюдается в интерференционных полосах вблизи точек, соответствующих половине максимального значения интенсивности светового потока в этих полосах. В публикациях [3-5] показано, что чувствительность параметров голографической интерферограммы к изменениям напряжения модулирующего электрического сигнала можно регулировать, изменяя параметры элементов оптической схемы и условия записи объёмной Фурье-голограммы. При известных параметрах оптической схемы экспонирования объёмной Фурье-голограммы и законе преобразования параметров электрического сигнала в параметры модулированного сигнального

светового потока, регистрация изменений в распределении интенсивности оптического поля в плоскости голографической интерферограммы или её проекции в прожекторной зоне позволяет однозначно определять параметры модулирующего электрического сигнала и их изменения.

Результаты проведённых исследований позволяют на практике реализовывать преимущества голографических фотонных телекоммуникационных устройств по сравнению с аналогичными по функциональному назначению электронными телекоммуникационными устройствами.

## **Заключение**

- 1) Принцип электрооптического преобразования сигналов в фотонных телекоммуникационных устройствах с использованием объёмных Фурье-голограмм не зависит от используемого метода модуляции и вида объёмной Фурье-голограммы (ООФГ или ОПФГ). Каждый этап реализации разработанного принципа электрооптического преобразования необходимо рассматривать в качестве отдельной задачи.
- 2) При падении когерентного светового потока в плоскость объёмной Фурье-голограммы независимо от её вида (ООФГ или ОПФГ) обеспечиваются канализация его энергии в заданной области пространства, а также его частотная и пространственная селекция. В качестве объекта модуляции могут быть использованы оба световых потока, падающих на объёмную Фурье-голограмму и формирующих в её плоскости голографическую интерферограмму.
- 3) В качестве модулируемых информативных параметров световых потоков, формирующих голографическую интерферограмму в плоскости объёмной Фурье-голограммы, могут быть использованы их частота, фаза и пространственное положение их фазовых центров. Когерентные световые пучки, падающие на объёмную Фурье-голограмму, должны быть узкими, сонаправленными или падающими на объёмную Фурье-голограмму в

направлениях оптимальной реконструкции оптического поля для этой голограммы. Чувствительность параметров голографической интерферограммы к изменениям напряжения модулирующего электрического сигнала можно регулировать, изменяя параметры элементов оптической схемы и условия записи объёмной Фурье-голограммы. Регистрация распределения уровней интенсивности светового потока и их изменений в плоскости голографической интерферограммы или её проекции в прожекторную зону позволяет однозначно определять параметры модулирующего электрического сигнала и их изменения.

**Финансирование:** Работа подготовлена в рамках научной темы «Разработка беспилотных технологий на основе комплексной поэтапной оптимизации с редукцией экстремальных задач и инструментов нейро-нечёткого моделирования (FZNE-202 2-0006)».

### 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. [web]. Технологическая платформа "Фотоника". Дата обращения: 10.06.2023. URL: [http://www.photonica.cislaser.com/data/program\\_photonica\\_2017-2020.pdf](http://www.photonica.cislaser.com/data/program_photonica_2017-2020.pdf)
2. Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии. Российский технологический журнал. 2016. № 1(10), С. 4-20.
3. Прыгунов А.Г. Физические основы использования голографического интерферометра в фотонных телекоммуникационных устройствах. Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. №2(42). С. 42-49. <http://doi.org/10.24412/2221-2574-2021-242-42-49>.

4. Прыгунов А.Г. Физические основы использования объемных отражательных голограмм в устройствах радиофотоники. Электросвязь. 2021. №8. С. 54-59. <http://doi.org/10.34832/ELSV.2021.21.8.009>
5. Прыгунов А.Г. Особенности применения объемных голограмм в фотонных устройствах телекоммуникационных систем. Радиотехника, 2023. Т. 87, № 1. – С. 116-125.
6. Прыгунов А.Г. Анализ свойств избирательности объемной голограммы в голографическом фотонном устройстве. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2021. № 11. URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.5>.
7. Звездина М.Ю., Елисеев А.В., Прыгунов А.Г., Русанов Р.И. Использование голографии в задаче стабилизации частоты генераторного оборудования. Электросвязь. – 2019. № 1. – С. 29-34.
8. Цветков А.Ю., Прыгунов А.Г., Аникейчик Н.Д., Рыбалко И.П., Осипов Н.А. Аналого-цифровое преобразование сигналов с угловой манипуляцией для программно-определяемых радиосистем. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 3. С. 402–408. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2016-16-3-402-408>
9. Габриэльян 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, номер 7(9). – С. 215-221.
10. Петров В.М., Шамрай А.В. СВЧ интегрально-оптические модуляторы. Теория и практика. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2021. – 225 с.
11. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ.- Москва: Радио и связь, 1989. – 504 с.
12. Гребнев А.К., Гридин В.Н., Дмитриев В.П. Оптоэлектронные элементы и устройства. Под ред. Ю.В. Гуляева. – Москва: Радио и связь, 1998. – 336 с.

13. Антонов С.Н., Филатов А.Л.. Акустооптическое управление энергетическим профилем лазерного излучения. Журнал технической физики, 2018, том 88, вып. 1. С. 93-97.
14. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.: ил.
15. Безуглов Д.А., Прыгунов А.Г., Трепачев В. В. Анализ дифракции света на эталонной голограмме при измерении перемещений объектов пространственно-спектральным методом. Автометрия. СО РАН, № 5, 1998. С. 21-28.

**Для цитирования:**

Прыгунов А.Г. Принцип преобразования сигналов в фотонных телекоммуникационных устройствах с использованием объёмных Фурье-голограмм. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.12>