

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.1.2>

УДК: 535.4(076.5); 621.382

ФОТОННЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИЁМНИК-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

А.Г. Прыгунов, С.В. Лазаренко

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

Статья поступила в редакцию 16 октября 2024 г.

Аннотация. Независимо от конструкций приёмников-преобразователей акустических сигналов в процессе акустоэлектрического преобразования звукового давления в электрические сигналы проявляются недостатки, которые приводят к ухудшению технических характеристик этих устройств. В процессе преобразования всегда имеют место нелинейные искажения, схемотехнически ограничены динамический диапазон таких преобразователей, их чувствительность и номинальный диапазон частот с допустимой нелинейностью амплитудно-частотной характеристики, присутствует электрический шум, имеется предрасположенность к самовозбуждению, имеет место так называемый «микрофонный эффект». Методы улучшения основных технических характеристик таких устройств приводят, как правило, к сильному усложнению их конструкции, повышению энергопотребления и увеличению массогабаритных характеристик. Актуальным, при этом, является вопрос формирования выходных сигналов акустоэлектрических приёмников-преобразователей (АЭП) непосредственно в цифровой форме представления и при обязательном выполнении нормативных требований к основным техническим характеристикам этих устройств. В статье представлен возможный вариант построения конструкции АЭП, в полной мере

отвечающей требованиям к техническим характеристикам такого устройства путём использования в его конструкции механического чувствительного элемента (ЧЭ) в виде мембраны в сочетании с голографическим интерферометром на основе пространственно-спектрального метода голографической интерферометрии. Разработана структурная схема направленного шумостойкого фотонного голографического АЭП, сформулированы и обоснованы достоинства его конструкции. Описан алгоритм функционирования голографического АЭП. Путём математического моделирования проведена оценка чувствительности голографического АЭП к перемещениям его мембраны. Графически показан высокий уровень этой чувствительности. Сделан обоснованный вывод о том, что имеется возможность однозначной и точной регистрации перемещений мембраны АЭП независимо от амплитуды этих перемещений, что обеспечивает высокие технические характеристики голографического АЭП. В статье представлен возможный вариант построения конструкции АЭП, в полной мере отвечающей требованиям к техническим характеристикам такого устройства путём использования в его конструкции механического чувствительного элемента (ЧЭ) в виде мембраны в сочетании с голографическим интерферометром на основе пространственно-спектрального метода голографической интерферометрии. Разработана структурная схема направленного шумостойкого фотонного голографического АЭП, сформулированы и обоснованы достоинства его конструкции. Описан алгоритм функционирования голографического АЭП. Путём математического моделирования проведена оценка чувствительности голографического АЭП к перемещениям его мембраны. Графически показан высокий уровень этой чувствительности. Сделан обоснованный вывод о том, что имеется возможность однозначной и точной регистрации перемещений мембраны АЭП независимо от амплитуды этих перемещений, что обеспечивает высокие технические характеристики голографического АЭП.

Ключевые слова: приёмник акустических сигналов, фотоника, мембрана, Фурье-голограмма, тонкая линза, чувствительность, динамический диапазон, частотный диапазон.

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

Введение

Независимо от конструкций приёмников-преобразователей акустических сигналов в процессе акустоэлектрического преобразования звукового давления в электрические сигналы проявляются недостатки, которые приводят к ухудшению технических характеристик этих устройств [1-3]. В процессе преобразования всегда имеют место нелинейные искажения, схемотехнически ограничен динамический диапазон таких преобразователей, их чувствительность и номинальный диапазон частот с допустимой нелинейностью амплитудно-частотной характеристики, присутствует электрический шум, имеется предрасположенность к самовозбуждению, имеет место так называемый «микрофонный эффект» [3]. Методы улучшения основных технических характеристик таких устройств приводят, как правило, к сильному усложнению их конструкции, повышению энергопотребления и увеличению массогабаритных характеристик. Актуальным, при этом, является вопрос формирования выходных сигналов акустоэлектрических приёмников-преобразователей (АЭП) непосредственно в цифровой форме представления и при обязательном выполнении нормативных требований к основным техническим характеристикам этих устройств. Возможным решением задачи конструктивного построения АЭП, в полной мере отвечающих требованиям к техническим характеристикам таких устройств, является использование в их конструкции механического чувствительного элемента (ЧЭ) в виде мембраны в сочетании с голографическим интерферометром на основе пространственно-спектрального метода голографической интерферометрии [4]. Устройство такого типа будет иметь высокую чувствительность в широких

частотном и динамическом диапазонах акустических сигналов при конструктивном механическом разрыве между чувствительным элементом и схемой формирования электрического сигнала. Такая конструкция голографического АЭП обеспечивает снижение отрицательного влияния «микрофонного эффекта». Частотный диапазон работы такого АЭП будет ограничен сверху частотным диапазоном колебаний мембраны, который определяется её инерционными свойствами, а динамический диапазон перемещений мембраны ЧЭ будет ограничен, как сверху, так и снизу максимально возможным размахом её колебаний. При этом сверху динамический диапазон такого устройства будет ограничен конструкцией, упругостью и механической прочностью мембраны АЭП, а снизу – чувствительностью его голографического интерферометра. АЭП с таким чувствительным элементом будет иметь низкое энергопотребление, обеспечит цифровую форму представления выходного сигнала, обусловленную пространственными частотами в плоскости интерферограммы, формируемой голографическим интерферометром, и возможность цифровой коррекции частотной характеристики этого устройства. Для решения ряда специальных задач имеется потребность в направленных приёмниках-преобразователях акустических сигналов, обеспечивающих высокую чувствительность при сохранении допустимых параметров нелинейности и возможность функционирования в широком динамическом диапазоне входных акустических сигналов в условиях вибраций и ударных динамических нагрузок. Задача разработки АЭП такого типа является актуальной.

Целью статьи является разработка варианта структурной схемы направленного шумостойкого фотонного голографического АЭП.

Решаемые задачи:

- 1) Разработка варианта структурной схемы направленного шумостойкого фотонного голографического АЭП.
- 2) Оценка чувствительности голографического АЭП к перемещениям его мембраны.

1. Разработка варианта структурной схемы направленного шумостойкого фотонного голографического АЭП

Возможны различные варианты технической реализации структурной схемы шумостойкого фотонного голографического АЭП. За основу конструкции корпуса голографического АЭП может быть взят корпус электродинамического шумостойкого микрофона с подвижной диафрагмой [3]. Выбор данной конструкции корпуса обусловлен тем, что сама по себе эта конструкция обеспечивает повышенную шумостойкость за счёт дифракции акустических волн на симметрично расположенных отверстиях верхней и боковых защитных сеток корпуса АЭП. Посторонние шумы, поступающие с разных направлений, проходят через отверстия верхней и боковых защитных сеток и, имея одинаковую интенсивность, но встречное направление распространения частично компенсируют друг друга. Однако полной компенсации акустических помех не происходит.

На рисунке 1 представлен вариант конструкции голографического АЭП.

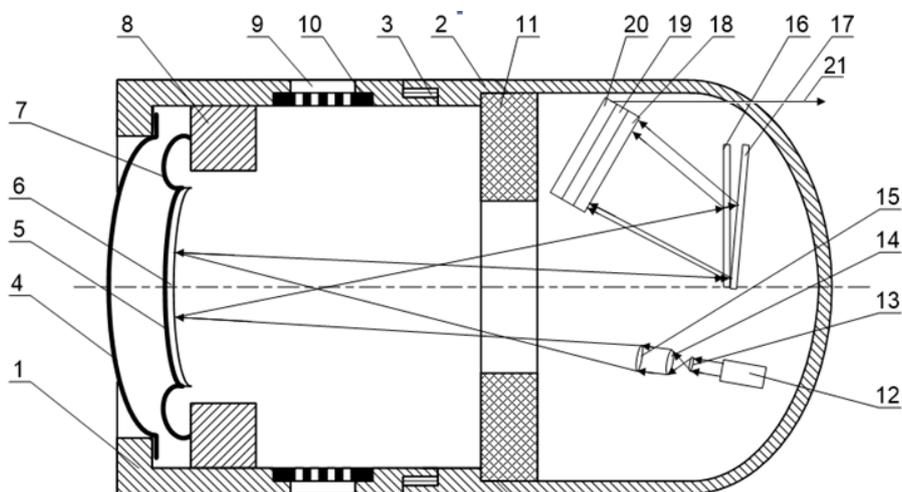


Рис. 1. Конструкция голографического АЭП.

Обозначения, использованные на рисунке 1: 1 – верхняя половина корпуса АЭП; 2 – нижняя половина корпуса АЭП; 3 – резьбовое соединение верхней и нижней половин корпуса АЭП; 4 – верхняя защитная сетка с отверстиями в ней; 5 – выпуклая мембрана; 6 – отражающий слой; 7 – гофрированная шайба; 8 – верхний фланец; 9 – отверстия в боковой

защитной сетке корпуса АЭП, обеспечивающие поступление акустических сигналов внутрь корпуса; 10 – боковая защитная сетка с отверстиями в ней; 11 – нижний фланец; 12 – лазер; 13, 14 – линзы коллиматора; 15 – собирающая линза; 16 – отражательно-пропускающая Фурье-голограмма; 17 – плоское зеркало; 18 – линейка фотоприемных устройств (ЛФПУ); 19 – линейка пороговых устройств (ЛПУ); 20 – преобразователь кода; 21 – выход АЭП.

Корпус АЭП, состоящий из верхней и нижней его половин 1, и 2 соответственно, обеспечивает механическую прочность его конструкции, защищает оптоэлектронную схему АЭП от механических повреждений, иных внешних воздействий и попадания грязи. Помимо этого, корпус АЭП обеспечивает дифференцированный доступ шумовых акустических сигналов к выпуклой мембране 5. Верхняя 1 и нижняя 2 половины корпуса АЭП соединены резьбовым соединением. Разделение корпуса АЭП на верхнюю и нижнюю половины обусловлено необходимостью упрощения технологической сборки конструкции АЭП, а также необходимостью проведения периодических регламентов и удаления пыли из его корпуса. Верхняя защитная сетка 4 обеспечивает защиту выпуклой мембраны 5 конструкции АЭП от механических повреждений, попадания пыли и грязи, а также обеспечивает дифракцию акустической волны на отверстиях защитной сетки 4, обеспечивая, тем самым, более равномерное распределение акустического давления по поверхности выпуклой мембраны 5. Выпуклая мембрана 5 совершает колебания, пропорциональные изменениям акустического давления, воздействующего на неё. На внутренней стороне выпуклой мембраны 5 методом напыления нанесен отражающий слой 6. Гофрированная шайба 7 расширяет диапазон амплитуд и частот механических колебаний выпуклой мембраны 5, а также обеспечивает её механическое крепление к фланцу 8. Выпуклая мембрана 5 с гофрированной шайбой 7, обеспечивающей крепление этой мембраны к элементам корпуса АЭП, являются механическим чувствительным элементом АЭП. Фланец 8 обеспечивает конструктивную жёсткость верхней половины корпуса АЭП 1, а также облегчает крепление внутри его корпуса гофрированной

шайбы 7. Боковые отверстия 9 на верхней половине корпуса АЭП 1 обеспечивают прохождение шумовых акустических сигналов через отверстия боковых защитных сеток 10 внутрь корпуса, обеспечивая, тем самым, шумостойкость АЭП. Боковые сетки 10 размещаются напротив отверстий в корпусе АЭП и обеспечивают поступление внутрь его корпуса шумовых составляющих акустических сигналов. Нижний фланец 11 обеспечивает конструктивную жёсткость нижней половины корпуса АЭП 2, а также защищает элементы оптоэлектроники схемы АЭП от шумовых акустических сигналов, поступающих через отверстия 9 корпуса. Лазер 12 формирует световой поток. Линзы коллиматора 13 и 14 обеспечивают формирование светового потока требуемого диаметра и с равномерным распределением плотности световой энергии в его сечении. Собирающая линза 15 обеспечивает фокусировку светового потока, задаёт кривизну его волнового фронта и направляет этот световой поток на отражающий слой 6 выпуклой мембраны 5. Световой поток, отражённый отражающим слоем 6 диафрагмы 5 падает на Фурье-голограмму 16, частично дифрагирует от неё, а частично проходит через эту Фурье-голограмму 16 насквозь и падает на плоское зеркало 17, которое отражает его. Отражённый световой поток повторно частично проходит через Фурье-голограмму 16 насквозь, но в обратном направлении. Световой поток, частично дифрагировавший от Фурье-голограммы и световой поток, отражённый плоским зеркалом и повторно прошедший Фурье-голограмму насквозь, но в обратном направлении, интерферируют в плоскости эмульсии Фурье-голограммы. Распределение интенсивности оптического поля в плоскости сформированной интерферограммы определяется пространственным положением выпуклой мембраны 5 относительно плоскости Фурье-голограммы 16. При колебаниях выпуклой мембраны 5 с нанесённым на неё отражающим слоем 6, обусловленных воздействием на неё давления акустического сигнала, в соответствии с величиной и частотой её пространственных перемещений меняется мгновенная фаза светового потока, отражённого отражающим слоем 6. В соответствии с этим изменяется

пространственно-спектральное распределение интенсивности оптического поля в плоскости формируемой интерферограммы. При этом, при удалении выпуклой мембраны 5 относительно плоскости Фурье-голограммы 16 интерференционные кольца удаляются от центра интерферограммы, а при её приближении – сбегаются к её центру [5]. Чем больше амплитуда колебаний выпуклой мембраны 5, тем на большее расстояние смещаются максимумы интерферограммы относительно её центра, а скорость смещения этих максимумов строго соответствует крутизне характеристики изменения во времени амплитуды акустического сигнала, воздействующего на выпуклую мембрану 5 АЭП. Сформированная интерферограмма проецируется стратами Фурье-голограммы 16 в прожекторную зону на поверхности ЛФПУ 18 [6]. Отдельными фотоприёмниками ЛФПУ 18 регистрируются изменения в распределении уровня интенсивности оптического поля в плоскости интерферограммы, обусловленные пространственными перемещениями вместе с выпуклой мембраной 5 отражающего слоя 6, нанесённого на внутренней стороне выпуклой мембраны 5. Электрические сигналы с выходов фотоприёмников ЛФПУ 18 поступают на соответствующие им пороговые устройства ЛПУ 19. На выходах отдельных ячеек ЛПУ 19 формируется позиционный двоичный код, однозначно соответствующий распределению интенсивности оптического поля в плоскости интерферограммы. Этот код с выходов ячеек ЛПУ 19 поступает на входы преобразователя кода 20, который обеспечивает его преобразование в электрические сигналы цифрового двоичного кода. Каждая кодовая комбинация на выходе преобразователя кода 20 строго соответствует пространственному положению выпуклой мембраны 5 относительно плоскости Фурье-голограммы. Электрические сигналы, представляющие собой комбинации цифрового двоичного кода, однозначно соответствующие уровням акустического давления на выпуклую мембрану 5 АЭП, с выхода преобразователя кода 20 передаются на выход фотонного голографического АЭП.

Шумостойкость и направленные свойства конструкции фотонного голографического АЭП, представленного на рис. 1, обусловлены конфигурацией и особенностями построения его корпуса [1-3]. Расширенный динамический диапазон и снижение уровня влияния микрофонного эффекта в разработанной конструкции АЭП обусловлены тем, что, независимо от амплитуды преобразуемого акустического сигнала, воздействие этого сигнала на АЭП приводит только к механическим перемещениям его выпуклой мембраны 5 с напылённым на её внутренней стороне отражающим слоем 6. Электрические параметры АЭП при этом не изменяются, а динамический диапазон изменений уровня интенсивности светового потока на входах фотоприёмников линейки фотоприёмных устройств 18 в плоскости интерферограммы остаётся постоянным и не зависит от амплитуды акустического сигнала, воздействующего на выпуклую мембрану 5 АЭП. При различных уровнях акустического сигнала, воздействующего на АЭП, изменяются только число и последовательность кодовых комбинаций цифрового двоичного кода на выходе АЭП. Высокая чувствительность голографического АЭП к незначительным по уровню изменениям акустического сигнала обеспечивается использованием в конструкции этого устройства голографического интерферометра с отражательно-пропускающей Фурье-голограммой, позволяющего регистрировать эти изменения [5]. Для повышения чувствительности АЭП в оптической схеме его конструкции может быть использован усилительный эффект тонкой собирающей линзы [7]. При этом практический интерес представляет вопрос оценки чувствительности голографического АЭП 5 к перемещениям его выпуклой мембраны.

2. Оценка чувствительности голографического АЭП к перемещениям его мембраны

Для оценки чувствительности голографического АЭП к перемещениям его мембраны рассмотрим рисунок 2, на котором представлен голографический интерферометр с линейкой фотоприёмных устройств, аналогичный использованному

в конструкции АЭП. На рисунке 2 использованы следующие обозначения: 1 – отражательно-пропускающая Фурье-голограмма; 2 – плоское зеркало; 3, 3' – лучи светового потока, дифрагировавшего от Фурье-голограммы; 4, 4' – лучи светового потока, отражённого плоским; 5 – линейка фотоприёмных устройств; ox – ось координат; A – начальное положение фазового центра светового потока; A' – положение фазового центра светового потока после его перемещения в пространстве; R_0 – расстояние от точки A до плоскости Фурье-голограммы; R_1 – расстояния от точки A' до плоскости Фурье-голограммы; a - b – область формирования интерферограммы; a' - b' – прожекторная зона интерферограммы; α – угол между Фурье-голограммой и плоским зеркалом; ox – ось координат.

Голографический интерферометр состоит из Фурье-голограммы 1 и плоского зеркала 2. Плоское зеркало 2 размещается в непосредственной близости от Фурье-голограммы и под малым углом α к ней ($\alpha \leq 3^\circ$). Фурье-голограмма является отражательно-пропускающей и экспонирована в линейном режиме.

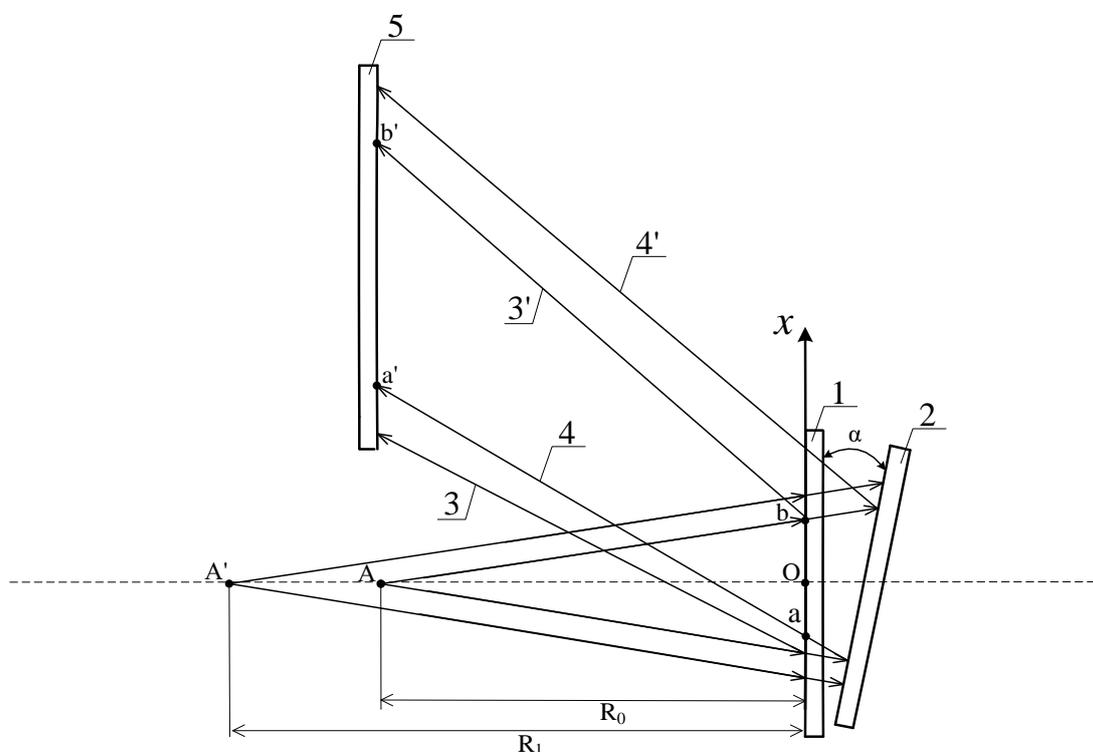


Рис. 2. Голографический интерферометр с линейкой фотоприёмных устройств.

Рассматривая голографический интерферометр применительно к его использованию в конструкции голографического АЭП (рисунок 1), видно, что перемещения его выпуклой мембраны 5 обуславливают аналогичные по величине перемещения Δr фазового центра светового потока, отражаемого этой выпуклой мембраной. Введём обозначение: $R_1 - R_0 = \Delta r$. Согласно [4,5] и распределение интенсивности переменной составляющей светового потока I_{\sim} в плоскости голографической интерферограммы описывается выражением:

$$I_{\sim}(x) = I_0 \cos \left\{ \frac{2\pi [R_0 + \Delta r]}{\lambda} [\delta_1(x) - \delta_2(x)] \right\}, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность интерференционного члена в выражении (1); λ – длина волны света;

$$\begin{aligned} \delta_1(x) &= \frac{x \cos \beta - R_1 \cos(\beta - \alpha)}{R_1 - x \cos \alpha}; \\ \delta_2(x) &= \frac{x \cos \beta_2 - R_1 \cos(\beta_2 - \alpha_1 - 2\alpha)}{R_1 - x \cos(\alpha_1 + 2\alpha)}; \\ \beta_2 &= \arctg \left(\frac{\sin(\alpha_1 - \beta) \sin(2\alpha^* + \alpha_2) - \sin(\alpha_1 + 2\alpha) \sin(\alpha_2 - \beta)}{\sin(\alpha_1 - \beta) \cos(2\alpha^* + \alpha_2) - \cos(\alpha_1 + 2\alpha) \sin(\alpha_2 - \beta)} \right); \\ \alpha_2 &= \arctg \left(\frac{\Delta r \sin \beta + R_1 \sin \alpha_1}{\Delta r \cos \beta + R_1 \cos \alpha_1} \right); \end{aligned} \quad (2)$$

α, α^* – угол между Фурье-голограммой и плоским зеркалом на этапе записи Фурье-голограммы и при измерениях, соответственно; $\alpha_1, \alpha_2, \beta, \beta_2$ – углы, определяющие пространственное положение фазового центра светового потока, падающего на Фурье-голограмму. В зависимости от направления перемещения точки А параметр Δr имеет разный знак: при удалении точки А от плоскости Фурье-голограммы параметр Δr является положительным, а при приближении – отрицательным.

При нормальном падении светового потока на Фурье-голограмму в случае размещения плоского зеркала параллельно этой голограмме при перемещении

точки А вдоль оптической оси светового потока будут выполняться условия: $\alpha^* = 0^\circ$; $\beta = \beta_2 = 90^\circ$; угол α является малым ($\alpha \leq 3^\circ$) и не равен нулю. В этом случае выражение (1) можно записать в виде:

$$I_{\sim}(x) = I_0 \cos \left\{ \frac{2\pi R_1}{\lambda} \left[\frac{R_1 \sin \alpha}{R_1 - x \cos \alpha} - \frac{R_1 \sin(\alpha_1 + 2\alpha)}{R_1 - x \cos(\alpha_1 + 2\alpha)} \right] \right\}, \quad (5)$$

где $R_1 = R_0 + \Delta r$.

Используя (5), исследуем зависимость $I_{H\sim} = f(\Delta r)$ нормированной переменной составляющей интенсивности светового потока в конкретной точке x плоскости голографической интерферограммы от величины перемещений Δr поверхности выпуклой мембраны 5 АЭП (рисунок 1). На рисунке 3 представлен график $I_{H\sim} = f(\Delta r)$. В таблице 1 показаны исходные данные для построения этого графика.

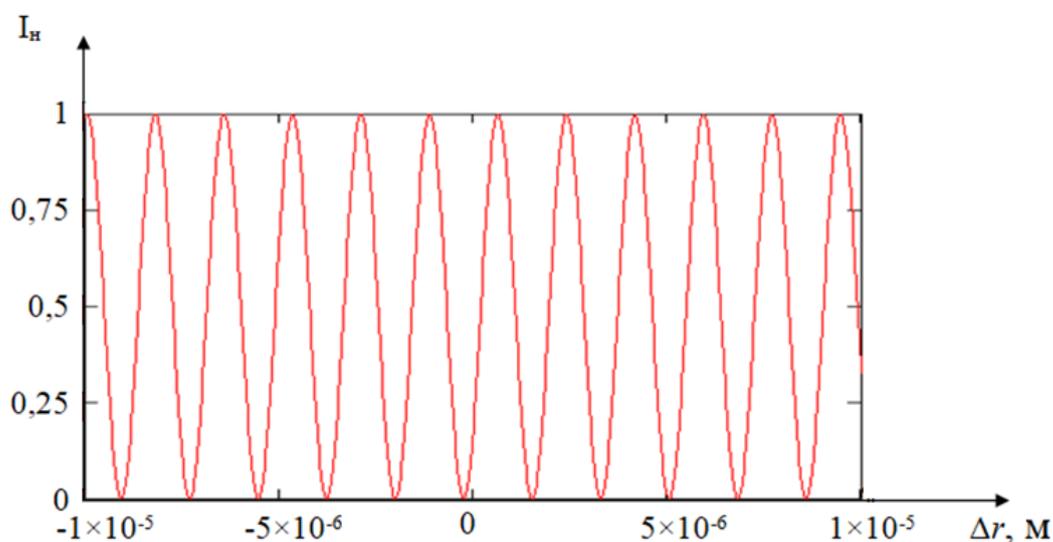


Рис. 3. График зависимости $I_{H\sim} = f(\Delta r)$.

Таблица 1. Исходные данные.

$R_1, \text{ м}$	$\alpha, ^\circ$	$\alpha_1, ^\circ$	$x, \text{ м}$	λ
0,1	1	20	10^{-3}	$0,63 \times 10^{-6}$

Из графика на рисунке 3 видно, что при исходных данных, показанных в таблице 1, при перемещениях Δr выпуклой мембраны 5 АЭП (рисунок 1) на расстояние от нуля до 10^{-5} м интенсивность светового потока в конкретной точке $x = 10^{-3}$ м плоскости голографической интерферограммы шесть раз смениться с минимума на максимум и наоборот соответственно. Это свидетельствует о высокой чувствительности голографического АЭП к перемещениям его выпуклой мембраны. С учётом однозначности взаимосвязи направления перемещения выпуклой мембраны 5 АЭП с эффектом «сбегания» или «разбегания интерференционных полос голографической интерферограммы» имеется возможность однозначной и точной регистрации перемещений Δr выпуклой мембраны 5 АЭП независимо от амплитуды этих перемещений, что обеспечивает высокие технические характеристики голографического АЭП. Это открывает широкие перспективы для практического использования голографического АЭП.

Заключение

1) Шумостойкость и направленные свойства конструкции фотонного голографического АЭП обусловлены конфигурацией и особенностями построения его корпуса. Расширенный динамический диапазон и снижение уровня влияния микрофонного эффекта в разработанной конструкции АЭП обусловлены тем, что, независимо от амплитуды преобразуемого акустического сигнала, воздействие этого сигнала на АЭП приводит только к механическим перемещениям его мембраны и не влияет на диапазон амплитудных значений электрических сигналов на выходах фотоприёмных устройств. Электрические параметры АЭП при этом не изменяются.

2) Результаты математического моделирования и результаты экспериментальных исследований показывают, что обеспечивается высокая чувствительность голографического АЭП к перемещениям его мембраны. С учётом однозначности взаимосвязи направления перемещения мембраны АЭП с эффектом «сбегания» или «разбегания интерференционных полос

голографической интерферограммы» имеется возможность однозначной и точной регистрации перемещений мембраны АЭП независимо от амплитуды этих перемещений, что обеспечивает высокие технические характеристики голографического АЭП. Это открывает широкие перспективы для практического использования голографического АЭП.

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. Крячко В.М. Акустические преобразователи: Учеб. пособие. / С.-Петербург. гос. ун-т. Санкт-Петербург: НИИХ СПбГУ, 2002. – 160 с.: ил.
2. Сапожков М.А. Электроакустика: Учебник для вузов. М.: Связь, 1978. 272 с.
3. Вахитов Ш.Я. Современные микрофоны. Теория. Проектирование. СПб.: Изд. СПбГУКиТ, 2003. – 394 с.
4. 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. 1998. № 5. С. 21-28.
5. Прыгунов А.Г., Сизов В.П., Безуглов Д.А. Метод определения перемещений объектов на основе анализа волновых фронтов оптического поля с использованием эталонных голограмм. // Оптика атмосферы и океана. № 6, 1995. – С. 826-830.
6. Прыгунов А.Г. Физические основы использования голографического интерферометра в фотонных телекоммуникационных устройствах. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. Научно-технический журнал, 2021. № 2. С. 42-48.

7. Прыгунов А.Г., Корнев А.С., Лазаренко С.В. Оценка чувствительности голографического интерферометра при оптических измерениях. // Измерительная техника. 2023. № 10. С. 56–62. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-10-56-62>.

Для цитирования:

Прыгунов А.Г., Лазаренко С.В. Фотонный голографический акустоэлектрический приёмник-преобразователь. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.1.2>