

УДК 551.5

UDC 551.5

**ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ
ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**PROMISING DIRECTION TO INCREASE
SENSITIVITY OF SONAR SYSTEMS
RECEIVERS**

A. G. Prygunov, R. I. Rusanov

Донской государственной технической
университет, г. Ростов-на-Дону, Российская
Федерация

agprygunov@mail.ru

В статье показана роль гидроакустических систем в обеспечении безопасности судоходства. Обоснована актуальность разработки чувствительных элементов приемников гидроакустических пьезоголографических чувствительных элементов. Представлена оптическая схема замещения пьезоголографического чувствительного элемента. Обоснован вывод о целесообразности создания пьезоголографических чувствительных элементов для приемников гидроакустических сигналов.

Ключевые слова: гидроакустические системы, приемники гидроакустических сигналов, пьезоэлемент, пьезоголографические чувствительные элементы, голографическая интерферометрия, пространственно-спектральный метод, голограмма Фурье.

Введение. Растет актуальность технологических задач, связанных с разработкой ресурсов на дне океана. В частности, Российская Федерация начинает освоение арктического шельфа [1, 2]. В этой связи необходимо обеспечить безопасность доставки полезных ископаемых морским транспортом от нефтедобывающих платформ до перегрузочных портов. В акватории океана и на морских судах размещаются гидроакустические системы [2, 3], которые позволяют отслеживать глубины по ходу движения транспортного судна и возможные препятствия в виде подводных скал или айсбергов. Именно с помощью гидроакустики производится поиск движущихся подводных объектов, осуществляется управление движением судов, прогнозируются стихийные бедствия, извержения вулканов, цунами, дрейф айсбергов и многое другое.

Актуальность разработки чувствительных элементов приемников гидроакустических сигналов на новых принципах. Следует отметить, что использование указанных систем для решения ряда актуальных задач гидроакустики не всегда возможно. Тому есть ряд причин [3, 4, 5]. В частности, акустическая волна, распространяясь в водной среде, быстро теряет энергию, снижая дальность работы системы. Улучшить дальность работы можно одним из двух способов:

- увеличить мощность излучения гидроакустической системы;
- повысить чувствительность ее приемного устройства.

В настоящее время в подводных устройствах приема гидроакустической волны наиболее часто используются чувствительные элементы, обеспечивающие некогерентный прием акустических сигналов с дискретной частотной модуляцией [4]. Чувствительные элементы таких систем представляют собой пьезоэлектрические или магнитострикционные преобразователи. В первом случае под воздействием звукового давления получают электрические заряды, которые подаются на вход усилителя, а он в

A. G. Prygunov, R. I. Rusanov,

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

agprygunov@mail.ru

The article shows the role of sonar systems in ensuring safety of navigation. It explains the urgency of the development of sensitive elements of the receivers of sonar signals piezo holographic sensitive elements. The optical scheme of piezo holographic sensitive element substitution is provided. The conclusion is drawn on the feasibility of piezo holographic sensitive elements for sonar signals receivers.

Keywords: sonar systems; sonar signal receivers; piezoelectric element; piezo holographic sensitive elements; holographic interferometry; spatial-spectral method; Fourier hologram.

свою очередь увеличивает электрическое напряжение до необходимого значения. В магнитострикционных приемниках происходит преобразование звуковой энергии в энергию электромагнитного поля. Считается, что эти системы наиболее эффективны для гидроакустики, но они имеют серьезный недостаток — ограниченное быстродействие.

Технологии построения гидроакустических систем с пьезоэлектрическими и магнитострикционными чувствительными элементами постоянно развиваются, что на современном этапе привело к появлению систем узконаправленного действия с высокой дальностью гидролокации и с повышенным быстродействием. Однако даже эти системы гидролокации не до конца решают задачу обеспечения дальности работы, достаточной для гарантии безопасности движения морского транспорта в условиях со сложным подводным рельефом, тем более в условиях Северного морского пути.

Важнейшими конструктивными элементами гидроакустических систем являются их антенные устройства. Именно от них в значительной мере зависят технические характеристики систем гидроакустики [4, 5]. Как правило, в настоящее время в качестве чувствительных элементов антенных устройств современных гидроакустических систем используются пьезокерамические преобразователи [5, 6]. В таких чувствительных элементах для приема гидроакустических сигналов используется прямой пьезоэффект.

Необходимо отметить положительные особенности таких чувствительных элементов. Это линейные зависимости:

- между перемещением поверхности пьезоэлемента и напряжением на его электродах (рис. 1);
- между силой гидроакустического давления и величиной перемещения поверхности пьезоэлемента (рис. 2).

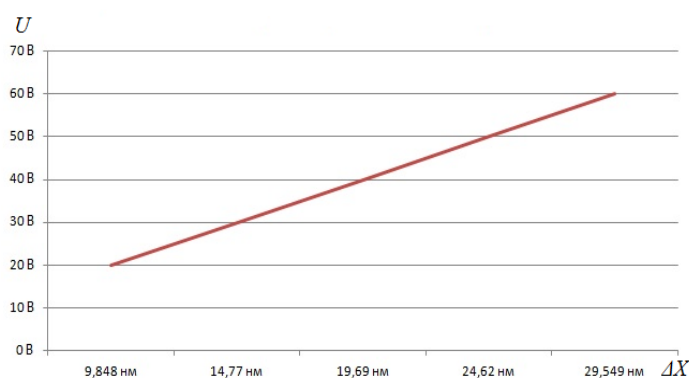


Рис. 1 — Характер зависимости между перемещением поверхности пьезоэлемента и напряжением на его электродах

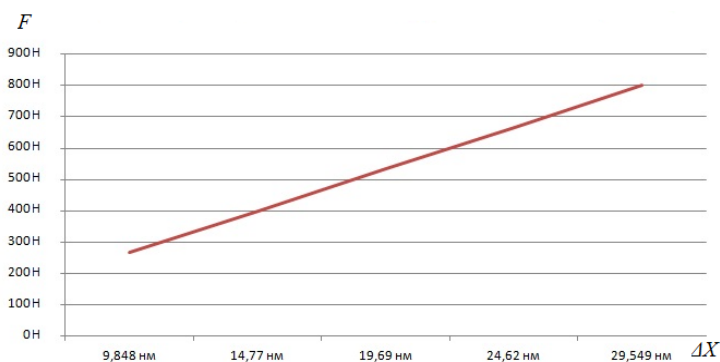


Рис. 2 — Характер зависимости перемещения поверхности пьезоэлемента от силы гидроакустического давления

Графические зависимости на рис. 1 и 2 получены для чувствительных элементов из пьезокерамики марки ЦТБС8 диаметром $D = 30$ мм, высотой $L = 2$ мм и с площадью входных электродов 678 мм^2 . Отрицательной особенностью таких чувствительных элементов является зависимость ве-

личины заряда на их электродах от температуры внешней среды, глубины погружения и других факторов. При этом в выходном сигнале достаточно сложно разделить изменения, обусловленные различными факторами, и технически трудно снизить влияние фоновых шумов на работу приемного устройства гидроакустической системы. Быстродействие и динамический диапазон приемного устройства такой системы ограничены характеристиками ее конструктивных элементов [4, 5, 6, 7].

Необходимо отметить, что величина перемещения поверхности пьезокерамического чувствительного элемента под действием внешнего гидроакустического давления слабо зависит от изменения температуры внешней среды, что обусловлено малым значением температурного коэффициента расширения используемой пьезокерамики [5, 6]. Таким образом, представляется целесообразным осуществлять высокоточное бесконтактное измерение перемещения поверхности пьезокерамического чувствительного элемента, пропорциональное величине измеряемого гидроакустического давления (принимаемого гидроакустического сигнала). Очевидно, что такой подход обеспечит высокую чувствительность и точность измерений.

Применение более совершенных чувствительных элементов приемных устройств гидроакустических систем позволит значительно повысить технические характеристики аппаратуры.

Оценка возможности создания пьезоголографических чувствительных элементов. Целью данной работы является изучение возможности использования голографической интерферометрии для построения приемных устройств систем гидролокации. Указанные системы должны обеспечивать высокоточное бесконтактное измерение перемещения поверхности пьезокерамического чувствительного элемента, пропорциональное величине измеряемого гидроакустического давления. Для такого измерения может использоваться пространственно-спектральный метод голографической интерферометрии [8, 9]. Именно этот метод наиболее эффективен в измерителях перемещений [9, 10, 11]. В этом случае выходная информация получается в результате анализа изменений, происходящих с волновыми фронтами интерферирующих когерентных световых потоков. Указанный метод обеспечивает возможность съема выходной информации в цифровом виде, что очень удобно для цифровой обработки. При этом обеспечивается возможность бесконтактного съема информации. Высокая точность и быстродействие измерений обеспечиваются за счет использования лазера в сочетании с электронно-оптическими устройствами обработки информации. Существенным достоинством метода является постоянство высокой чувствительности измерителей во всем рабочем диапазоне измерений. Высокая чувствительность измерения перемещений возможна в широком динамическом диапазоне, ограниченном геометрическими размерами схемы измерителя, параметрами когерентности и энергетическими характеристиками излучения (не хуже $\lambda/4$, где λ — длина волны оптического излучения). В процессе измерений обеспечивается концентрация не менее 40 % энергии светового потока оптического излучателя в пределах апертуры фотоприемного устройства, перекрывающей размеры центрального пятна прожекторной зоны восстановленного изображения [10, 11].

Фотоприемные устройства, измеряющие интенсивность светового потока в плоскости интерференции, могут размещаться непосредственно в плоскости исследуемого изображения за пределами оптической оси схемы измерителя — таким образом обеспечивается возможность автоматизации процесса измерений. Кроме того, в данном случае могут быть созданы сравнительно простые высокочувствительные и высокоточные устройства для измерения перемещений. При этом достигается высокая контрастность формируемой интерферограммы. Следует отметить также наблюдаемую высокую устойчивость к паразитным вибрациям корпуса измерителя перемещений и к ударным нагрузкам. Это весьма актуальные преимущества, учитывая условия эксплуатации приемных устройств гидроакустических систем [3, 4, 5]. В данном случае речь идет о том, что ос-

новными источниками гидроакустических помех, воздействующих на гидроакустические антенны, являются судовые машины и механизмы, гребные винты, турбулентный пограничный слой, а также другие гидроакустические системы, одновременно работающие на судне. Каждый источник помех создает шумы определенного спектра. Они попадают на пьезоэлементы, распространяясь по корпусу судна, в воде вдоль корпуса, отражаясь от объектов рассеяния в морской среде или от дна.

Пространственно-спектральный метод голографической интерферометрии мало критичен с точки зрения технической реализации оптических каналов, по которым распространяются сравниваемые волновые фронты. Он является дифференциальным по отношению к ошибкам, вносимым элементами оптических каналов, позволяет измерять перемещения объектов произвольной формы и с различной степенью шероховатости поверхностей, обеспечивает более высокую чувствительность и точность измерений [9, 10, 11].

Разработка пьезоголографического чувствительного элемента антенны гидроакустической системы должна учитывать особенности пространственно-спектрального метода голографической интерферометрии. При измерении перемещений исследуются изменения, происходящие не с изображением объекта, а с его фурье-образом пространственных частот. Плоскость интерференционной картины, формируемой в процессе измерений, выносится за пределы оптической оси светового потока, отраженного чувствительным пьезоэлементом. В качестве элемента, чувствительного к фазе светового потока, используется голограмма Фурье полуотражательного типа. Вместе с размещенным за ней отражателем она обеспечивает выделение низкочастотных пространственных составляющих, формируемых в плоскости главного изображения. Метод позволяет измерять перемещения пьезоэлемента относительно плоскости эталонной голограммы. В плоскости главного изображения формируется интерференционная картина в виде темных и светлых полос эллиптической формы с незначительным эксцентриситетом. При удалении объекта измерений от эталонной голограммы интерференционные полосы разбегаются от центра изображения, а при его приближении к эталонной голограмме — сбегаются к центру [9, 11, 12].

Получение интерферограммы в плоскости главного изображения предполагает обязательное выполнение условий когерентности интерферирующих световых потоков. Углы между волновыми векторами интерферирующих световых потоков малы и ограничены необходимостью выполнения двух взаимоисключающих требований:

— для удобства вынесения главного изображения за пределы оптической оси элементов схемы измерителя необходимо обеспечить максимальный угол между голограммой и отражателем, размещаемым за ней;

— для обеспечения максимальной площади пересечения интерферирующих световых потоков, формирующих главное изображение, угол между волновыми векторами этих потоков (а значит, угол между голограммой и отражателем) должен быть близок к нулю.

Можно отметить, что динамический диапазон работы приемного устройства гидроакустической системы с пьезоголографическим чувствительным элементом будет шире, чем у пьезоакустических систем. Это обусловлено тем, что входной акустический сигнал будет измеряться не за счет амплитуды электрического заряда на электродах пьезоэлемента, а следующими параметрами интерферограммы, формируемой голографическим интерферометром:

- интенсивность и ширина интерференционных полос;
- диапазон пространственных перемещений интерференционных полос в плоскости интерферограммы;
- скорость перемещений интерференционных полос в плоскости интерферограммы.

Влияние фоновых шумов на работу пьезоголографического приемного устройства гидроакустической системы может быть снижено (по сравнению с пьезоакустическим устройством при-

ема гидроакустических волн). С этой целью в качестве информативных параметров используются диапазон и скорость перемещений максимумов интерференционных полос различных порядков.

Быстродействие пьезоголографических приемных устройств гидроакустических систем будет определяться быстродействием фотоприемного устройства, порогового устройства и решающего устройства.

Оценим чувствительность пьезоголографического чувствительного элемента к перемещениям его поверхности. Рассмотрим для этого рис. 3 и 4, иллюстрирующие оценку чувствительности.

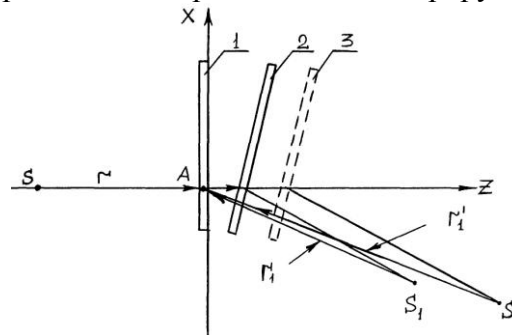


Рис. 3 — Оптическая схема пьезоголографического чувствительного элемента

На рис. 3 использованы обозначения: 1 — полупрозрачная голограмма Фурье; 2, 3 — отражатель (объект измерений) до и после перемещений соответственно; S — точечный источник когерентного света; S_1, S_1' — зеркальные отражения точечного источника S до и после перемещений объекта измерений соответственно; r, r_1, r_1' — расстояния от источников S, S_1 и S_1' до произвольной точки A в плоскости голограммы.

В качестве объекта измерений выступает пьезоэлемент с отражающим слоем, нанесенным путем напыления на его боковую грань, обращенную к голограмме Фурье.

Следует отметить, что расстояния r, r_1 и r_1' отличаются незначительно. Учитывая этот факт, а также заданные дифракционную эффективность голограммы и коэффициент отражения перемещающегося отражателя, амплитуды световых потоков от источников S, S_1 и S_1' можно считать равными. В плоскости изображения будут интерферировать световой поток, дифрагировавший от голограммы Фурье, и световой поток от точечного источника S , прошедший через голограмму, отразившийся от боковой грани пьезоэлемента и повторно прошедший через голограмму Фурье.

Эквивалентная оптическая схема пьезоголографического чувствительного элемента, которая адекватно отражает принцип формирования информационной интерферограммы, представлена на рис. 4.

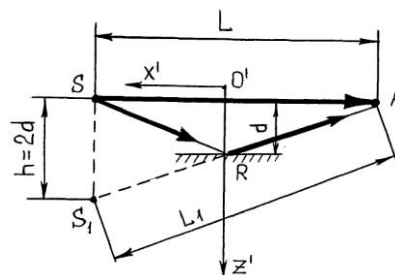


Рис. 4 — Эквивалентная оптическая схема пьезоголографического чувствительного элемента

На рис. 4 использованы обозначения: S — положение действительного точечного источника; R — отражатель; расстояние вдоль оси z' между точками S и S_1 равно h , причем $h = 2d$; расстояние SA равно L , а расстояние S_1A равно L_1 .

Рассмотрим нормальное, т. е. вдоль оси z , перемещение пьезоэлемента 3 (см. рис. 3). При реконструирующем световом потоке с плоским фронтом точку A можно совместить с точкой S , при этом L будет равно нулю, а

$$\Delta r = r_1 - r = \Delta h. \quad (1)$$

Условия интерференции световых потоков на рис. 3 и 4 таковы, что при перемещении отражателя фазовый сдвиг удваивается. С учетом этого условие противофазности будет определяться

выражением:

$$\Delta r = 2\Delta h = (2n+1)\frac{\lambda}{2}, \quad (2)$$

где n — номер интерференционного порядка, λ — длина волны оптического излучения.

Выразим из (2) величину Δh :

$$\Delta h = \frac{\lambda(2n+1)}{4}. \quad (3)$$

Для тангенциального перемещения пьезоэлемента 3 (см. рис. 3) можно получить выражение

$$\Delta L = \frac{(2n+1)\lambda}{2}. \quad (4)$$

Выражения 3 и 4 показывают чувствительность пьезоголографического приемного устройства к нормальным и тангенциальным перемещениям пьезоголографического чувствительного элемента по смене на π разности фаз интерферирующих световых потоков.

Заключение. Анализ выражений (3) и (4) показывает, что чувствительность голографической гидроакустической системы с пьезоголографическим чувствительным элементом может быть приближена до уровня 10^9 м. Этот факт наряду с остальными достоинствами бесконтактного измерения перемещений поверхности пьезоэлемента приемной антенны гидроакустической системы позволяет сделать обоснованный вывод о возможности и целесообразности создания пьезоголографических приемных устройств для гидроакустических систем.

Библиографический список

1. О долгосрочной государственной экономической политике : Указ Президента РФ от 7 мая 2012 года № 596 [Электронный ресурс] / Президент РФ. — Режим доступа: <http://base.garant.ru/70170954/> (дата обращения: 28.04.17).
2. Прогноз научно-технического развития Российской Федерации на долгосрочную перспективу до 2030 года [Электронный ресурс] / Министерство образования и науки Российской Федерации. — Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/41d4b737638b91da2184.pdf>. — 72 с. (дата обращения: 28.04.17).
3. Румынская, И. А. Основы гидроакустики / И. А. Румынская. — Ленинград : Судостроение, 1979. — 209 с.
4. Смаришев, М. Д. Гидроакустические антенны / М. Д. Смаришев, Ю. Ю. Добровольский. — Ленинград : Судостроение, 1984. — 304 с.
5. Свердлин, Г. М. Гидроакустические преобразователи и антенны / Г. М. Свердлин. — Ленинград : Судостроение, 1980. — 232 с.
6. Глозман, И. А. Пьезокерамика / И. А. Глозман. — Москва : Энергия, 1972. — 192 с.
7. Гуревич, С. Б. Передача и обработка информации голографическими методами / С. Б. Гуревич // Москва : Советское радио, 1978. — 304 с.
8. Бутиков, Е. И. Оптика : учеб. пособ. для вузов / Е. И. Бутиков ; под ред. Н. И. Калитеевского. — Москва : Высшая школа, 1986. — 512 с.
9. Милер, М. Голография / М. Милер ; пер. А. С. Сударушкин, В. И. Лусников. — Ленинград : Машиностроение, 1979. — 207 с.
10. Прыгунов, А. Г. Метод определения перемещений объектов на основе анализа волновых фронтов оптического поля с использованием эталонных голограмм / А. Г. Прыгунов, В. П. Сизов, Д. А. Безуглов // Оптика атмосферы и океана. — 1995. — Т. 8, № 6. — С. 826–830.
11. Увеличение плотности энергии информационного поля оптического интерферометра дифракционным голографическим методом / А. Г. Прыгунов [и др.] // Современные проблемы радиоэлектроники : мат-лы 4-й науч. междунар. конф. — Ростов-на-Дону : ЮРГУЭС, 2012. — С. 178–181.
12. Исследование условий экспонирования эталонной голограммы голографического интерферометра / М. Ю. Звезда [и др.] // Физические основы приборостроения. — 2012. — Т. 1, № 2. — С. 6571.