

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Е.В.Коньков

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова
Российской Академии наук (ФИРЭ РАН)

ekonkov@yandex.ru

Исследована возможность применения ультразвуковой интерферометрии как нового метода высокоточных линейных и угловых измерений. Общий принцип предлагаемого метода состоит в использовании бегущей акустической волны в твердотельном волноводе в качестве линейной или угловой измерительной шкалы в зависимости от геометрии волноводной системы. Разработан ультразвуковой интерферометр, реализующий предложенный принцип. Экспериментально получена чувствительность к линейному перемещению около 0,2 мкм и относительная точность порядка 10^{-5} .

Современное развитие высокоточного машиностроения, станкостроения, робототехники и других направлений техники и технологии ставит новые требования по метрологии пространственного положения подвижных элементов систем, а именно по измерению их линейных и угловых координат с точностью порядка 10^{-6} при относительно высоких скоростях изменения измеряемых величин. Обеспечение таких точностей в настоящее время возможно только с использованием новых физических принципов.

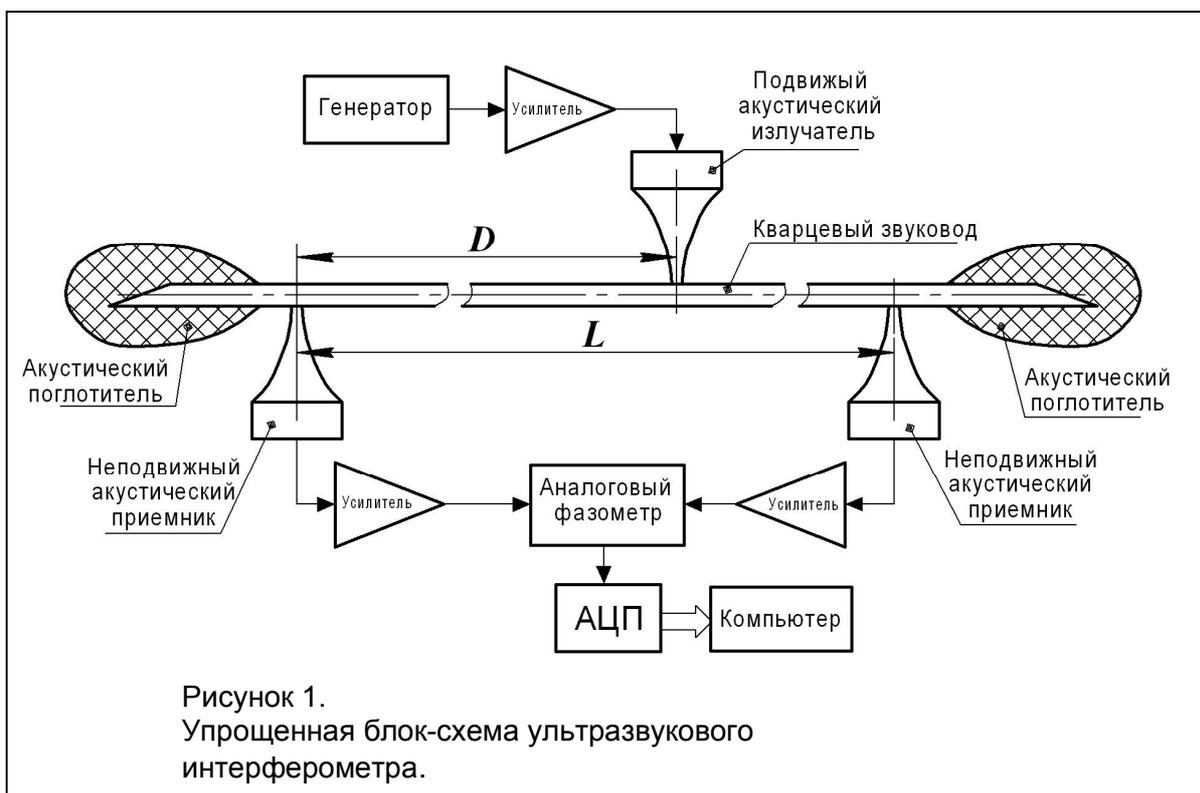
В данной работе исследуется возможность применения волновых процессов для абсолютных высокоточных измерений угловых и (или) линейных координат объектов. Общий принцип предлагаемого метода состоит в использовании бегущей или стоячей волн в качестве линейной или угловой измерительной шкалы в зависимости от геометрии волноводной системы. Такой подход, от части, не является оригинальным, если иметь в виду интерференционные измерения, выполняемые в оптическом или СВЧ диапазоне электромагнитных волн. Однако интерференционные измерения обычно выполняются в какой-либо среде, чаще всего в воздухе, при этом зависимость скорости распространения излучения от параметров среды (температура, давление, влажность, состав и т.д.) не позволяет обеспечить требуемую абсолютную точность. Кроме того, интерферометры оптического диапазона не могут быть использованы при высоких скоростях изменения расстояния (до нескольких метров в секунду), так как в этом случае частота следования интерференционных максимумов находится за пределами быстродействия современных электронных измерительных средств. Прямые угловые измерения в пределах $0 - 360^\circ$ в принципе невозможны с применением оптических интерферометров.

Конкретная практическая задача на первом этапе работы формулируется следующим образом. Требуется измерять линейное положение подвижной части металлообрабатывающего станка с числовым программным управлением (ЧПУ) в диапазоне $0 - 2$ м с абсолютной точностью 10 мкм на скорости до 2 м/с. Несложные оценки и существующий опыт разработки подобных устройств на основе линейных оптических растров [1,2] показывают, что для обеспечения такой точности необходимо создать линейную равномерную шкалу (линейку) с периодом порядка 100 мкм, что соответствует субмиллиметровому (СБММ) диапазону. Теоретически возможно построить такую линейку используя, например, диэлектрический волновод и соответствующую приемно-передающую систему СБММ диапазона электромагнитных волн, реализующую интерферометрический принцип. Ясно, что такая система будет крайне сложной, дорогостоящей и габаритной, а ее реальную точность априори оценить весьма сложно.

Оригинальным решением является использование волн СБММ диапазона, но иной физической природы, а именно акустических волн в твердотельных волноводах. Принципиальным преимуществом в этом случае является отличие скорости распространения акустических волн от электромагнитных на 5 порядков. В твердых телах скорость звука находится в пределах $2 - 6$ км/с, при этом СБММ диапазон длин волн соответствует

частотному диапазону 1 – 10 МГц. Акустическая техника этого диапазона хорошо развита, относительно проста, компактна и дешева. Кроме того, скорость звука в твердом теле более стабильна по температуре относительно скорости электромагнитного излучения. Главным ограничением точности акустических измерений может быть только неравномерность скорости звука в волноводе, обусловленная неоднородностью материала и сечения волновода по длине.

Для исследования предложенного метода разработана экспериментальная установка, фактически являющаяся макетом акустического датчика линейных перемещений (акустической линейки). Упрощенная схема установки показана на Рисунке 1.



Механической основой установки является измерительный микроскоп ММИ-2, оптическая часть которого демонтирована. Подвижный стол микроскопа и система микрометрических винтов с электронным цифровым отсчетом обеспечивают точность позиционирования и измерения не хуже 2 мкм. Максимальный ход микрометрических винтов ограничен 80 мм. На подвижном столе микроскопа установлена несущая плита, на которой монтируются акустические и электронные элементы линейки. С помощью акустического излучателя в волноводе возбуждается волна, распространяющаяся к приемникам. Излучатель закреплен жестко на неподвижной консоли микроскопа. Волновод и приемники установлены жестко на плите. Таким образом, излучатель подвижен относительно волновода и системы приемников, а относительное положение излучателя и приемников по оси волновода есть измеряемая величина.

В качестве приемников и излучателей использованы пьезоэлектрические преобразователи, снабженные экспоненциальными концентраторами поля и предварительными усилителями. Излучатель питается от генератора синусоидального напряжения. Частота излучения выбиралась так, чтобы длина волны была около 200 мкм и соответствовала одному из резонансов пьезоэлектрических преобразователей. Непосредственно измеряемой величиной является разность фаз выходных сигналов приемников, которая абсолютно линейна по измеряемому расстоянию. Фазовые измерения выполнялись с помощью аналогового

измерителя разности фаз с последующей оцифровкой сигнала и обработкой в компьютере посредством специального программного обеспечения. Система обеспечивает среднеквадратичную погрешность измерения разности фаз не более $0,5^\circ$.

По соображениям однородности акустических свойств в качестве волноводов исследовалось кварцевое волокно типа F500 диаметром от 0,5 до 1,5 мм, используемое для изготовления оптоволоконных световодов. Этот материал обладает предельно низким коэффициентом теплового расширения – менее чем $10^{-6}/^\circ\text{C}$, это меньше, чем у лучших инваров. Соответственно, температурный коэффициент скорости звука имеет такой же порядок. Кроме того, оптическое кварцевое волокно обладает низким поглощением ультразвука. Измеренная величина поглощения составила менее 1 дБ/м. Современные технологии изготовления оптоволокна обеспечивают высочайшую однородность физических и геометрических параметров волновода по длине. Все эти свойства оптоволокна позволяют использовать его в качестве звуковода в высокоточном интерферометре.

Чтобы амплитуда выходных сигналов приемников мало зависела от измеряемого расстояния, что необходимо для реализации метода фазовых измерений, концы волновода снабжены акустическими поглотителями. Поглотители изготовлены из специальной поглощающей резины, акустическое согласование поглотителей с волноводом обеспечивается с помощью иммерсионной жидкости. Это позволило получить КСВ близким к единице.

Конструкция и способ установки акустических приемников и излучателя обеспечивают возбуждение поперечной (сдвиговой) волны в волноводе, скорость которой около 3 км/с.

В результате первых экспериментов и измерений, выполненных на этой установке, получены следующие результаты:

Чувствительность к перемещению не хуже 0,2 мкм. Абсолютная точность измерений в пределах хода подвижного стола (80 мм) не превышает ошибку позиционирования, то есть не более 2 мкм. Закон распределения ошибок нормальный. Это позволяет надеяться, что на расстояниях порядка метра требуемая точность может быть обеспечена. Предельная скорость изменения измеряемого расстояния оценивается в 10 м/с. Полученные результаты будут использованы на следующем этапе работы, на котором планируется изготовить аналогичную систему, способную измерять расстояния до 2 м. Метод может быть использован и для угловых измерений, если волновод выполнить в виде кольца, установленного на какую-либо осевую систему.

ЛИТЕРАТУРА

1. Домрачев В.Г., Матвеевский В.Р., Смирнов Ю.С. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений, М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Преобразователи линейных перемещений. Каталог и описание производимых изделий, СКБ ИС, С.-Петербург, 2004.