

УДК 531.715.1

**УЗЕЛ ПРИВОДА ОТРАЖАТЕЛЯ КОРОТКОГО ПЛЕЧА
ДВУХВОЛНОВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ДРОБНЫХ ЧАСТЕЙ
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС**

Е.А. Лавров, А.В. Кожеманов

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
lavrov@vniiftri.ru,
kaw@vniiftri.ru*

Аннотация. Разработан и включён в состав двухволнового лазерного интерферометра пьезоактюатор, имитирующий перемещение зеркала опорного плеча для накопления результатов измерений и обеспечения разрешения менее одной интерференционной полосы. Рассматриваются результаты измерений лазерного интерферометра, разработанного и совершенствуемого во ФГУП «ВНИИФТРИ» для воспроизведения единицы длины в диапазоне до 60 м, с включением в оптическую схему узла привода отражателя. Оценивается влияние метеоусловий лабораторий на проведение измерений.

Ключевые слова: лазерный интерферометр, узел привода отражателя, прецизионные измерения длины.

**DRIVE UNIT OF SHORT HAUL REFLECTOR OF
A TWO-WAVE INTERFEROMETER FOR REGISTRATION
OF FRACTIONAL PARTS OF INTERFERENCE BANDS**

E.A. Lavrov, A.V. Kozhemanov

*FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,
lavrov@vniiftri.ru,
kaw@vniiftri.ru*

Annotation. Piezo actuator has been developed and incorporated into a two-wave laser interferometer that simulates the movement of the reference arm mirror to accumulate measurement results and ensure a resolution of less than one interference fringe. The results of measurements of a laser interferometer, developed and improved at FSUE "VNIIFTRI" for reproducing a unit of length in the range up to 60 m, with the inclusion of a reflector drive unit in the optical arrangement, are considered. The influence of meteorological conditions of laboratories on measurements is estimated.

Key words: laser interferometer, reflector drive unit, precision length measurements.

Введение

В настоящее время лазерные интерферометры (ЛИ), используемые в области прецизионных измерений длины, имеют недостаток, связанный с необходимостью измерения профиля метеоусловий вдоль измерительной трассы, влияющих на показатель преломления.

Рассматривается проблема измерений ЛИ при минимальном знании метеопараметров вдоль измерительной трассы. Метод измерений заключается в определении показателя преломления на трассе через разность оптических путей для двух различных длин волн и увеличении разрядности счетов интерференционных полос.

Лазерный измеритель перемещений на основе интерферометра Майкельсона

Для метрологических исследований нашли широкое применение приборы, основанные на лазерных интерференционных методах измерений, и возникает необходимость их совершенствования. С данной целью проводится работа по оценке возможности применения двухволновых технологий измерения длины на базе твердотельного лазера в составе комплекса отечественных средств передачи единицы длины к рабочим средствам измерений. Предполагается, что такие технологии позволят снизить требования к учёту метеопараметров вдоль измерительной трассы существующих и перспективных средств метрологического обеспечения средств измерений приращений координат.

Измеритель перемещений разрабатывается по схеме интерферометра Майкельсона с использованием высокостабильного лазера, излучающего на двух длинах волн (532 и 1064 нм). Для достижения требуемых точностей ЛИ используется совместно с измерительным линейным базисом длиной 60 м, находящемся в закрытом, защищённом от внешних воздействий, помещении.

Используемая схема обеспечивает реверсивный счёт интерференционных полос и позволяет определить направление движения уголкового отражателя. При данном методе измерения разрешение ограничено длиной волны используемого излучения (порядка 1 микрона) несмотря на то, что используемый метод счёта разрешает перемещение, равное четверти длины волны.

Достижение необходимой разрешающей способности при использовании вышеописанного метода измерений требует его доработки.

Метод повышения устойчивости лазерного интерферометра к метеоусловиям вдоль измерительной трассы

Методы учёта влияния атмосферы предполагают использование вдоль всей измерительной трассы датчиков температуры, давления и относительной влажности. На используемом в настоящее время эталоне вдоль трассы длиной 60 м такие датчики установлены через каждые 2 м. Соответственно блок компенсации изменения параметров окружающей среды, вычисляющий поправки, связанные с неравномерностью метеоусловий, обрабатывает данные для внесения поправок на преломление воздуха со всех 32 датчиков, учитывая положение уголкового отражателя во время проведения измерений. Достижение необходимой точности лазерного интерферометра при линейных измерениях может быть получено только при использовании блока компенсации. В противном случае изменения показателя преломления воздуха могут привести к значительным ошибкам измерений.

В целях ухода от таких проблем, как точный расчёт показателя преломления на рабочей длине волны для каждого промежутка трассы, а также упрощения учёта влияния метеоусловий, в качестве излучателя используется двухволновой лазер Орвилаз-532-SM-5-C. Его использование позволит ограничить количество используемых датчиков температуры и влажности до двух в конце трассы, упрощая при этом систему и скорость расчётов для показателей преломления. Двухволновый метод измерения перемещений позволяет существенно упростить требования к поддержанию постоянной температуры вдоль измерительной трассы. Метод заключается в определении среднеинтегрального группового показателя преломления не через метеопараметры вдоль трассы, а через разность оптических путей для двух различных длин волн на этой трассе. Однако использование двухволнового лазера без добавления в схему дополнительных технических решений не позволяет добиться требуемой точности измерений, что было подтверждено экспериментально.

Метод повышения чувствительности (разрядности) путём добавления в схему псевдослучайных ошибок позволяет достичь требуемой точности. В этих целях используется устройство, имитирующее перемещение блока делителя с опорным каналом. При обработке результатов измерений получают величины с дробными значениями от счёта полос за счёт накопления сигнала, если время измерения будет достаточным для последующего усреднения полученных значений.

Устройство, имитирующее перемещение, устанавливается на короткое плечо интерферометра (углового отражателя). Псевдослучайное перемещение зеркала опорного плеча интерферометра Майкельсона позволяет изменить длину опорного плеча и, соответственно, интерференционную картину на фотодетекторе. В торце малого ретроотражателя размещается пьезоактюатор, создающий перемещения на величину деформации пьезоэлемента. Пьезоактюатор используется в полосе частот от 10 до 150 Гц с амплитудой 2–3 длины волны лазерного излучения. Выбор частотного диапазона обусловлен нагревом пьезоэлемента при повышении частоты управляющего сигнала. На рис. 1 представлена зависимость температуры пьезоэлектрического чипа Thor Labs TA0505D024W, где наблюдается резкий рост в области более 150 Гц. Перемещение становится наиболее выгодным для расчётов при накоплении результатов измерений, если оно имеет определённую частотную характеристику. Спектр такого сигнала (управляемого перемещением) будет иметь такую же форму, как и спектр колебаний зеркала опорного плеча. Частотная характеристика имеет форму случайного распределения, получается частотная зависимость длины короткого плеча интерферометра, представленная на рис. 2.

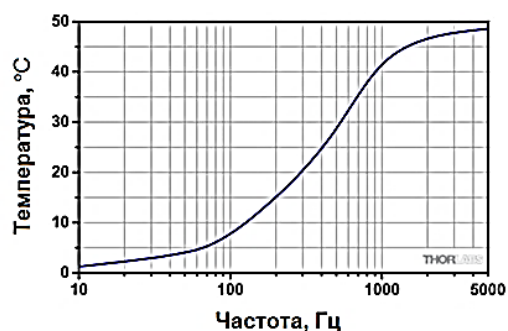


Рис. 1. Зависимость температуры от частоты управляющего синусоидального напряжения с амплитудой от 0 до 75 В

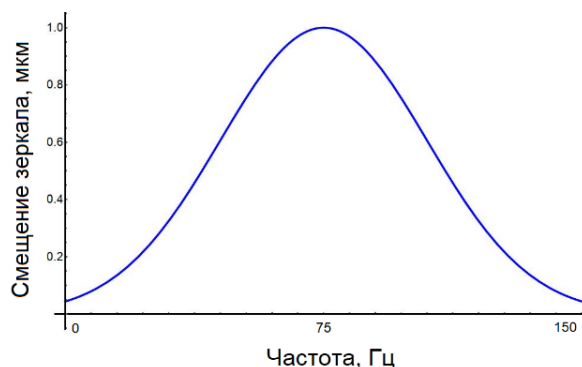


Рис. 2. Зависимость смещения уголкового отражателя короткого плеча от частоты колебаний пьезоэлемента

Измерения перемещений считаются от 100 до 10000 раз, что позволяет при обработке результатов измерений при накоплении получить величины с дробными значениями от счёта интерференционных полос. При псевдослучайном возбуждении это перемещение будет также псевдослучайным. Это позволит при обработке результатов измерений при накоплении получить величины с дробными значениями от счёта полос. Как следствие, СКО измерений перемещений уменьшается в $\sim\sqrt{N}$ отсчётов, что позволяет получить разрешение по измерению перемещений до $10^{-4}\lambda$, а СКО измерений перемещений — от $10^{-2}\lambda$ до $2 \cdot 10^{-1}\lambda$. Если время измерения будет достаточным для обеспечения допустимой ошибки измерения разности оптических путей $\delta\Delta S = 110$ нм (для дистанции 60 м), то будет достигнута необходимая погрешность измерения перемещения.

Таким образом, была поставлена актуальная задача по созданию узла привода отражателя короткого плеча двухволнового интерферометра. Узел позволяет регистрировать дробные части интерференционных полос при помощи накопления результатов измерений с включённым в оптическую схему псевдошумовым сигналом.

Экспериментальные результаты при работе с узлом привода отражателя короткого плеча двухволнового интерферометра

Для генерации управляющего сигнала используется аудиовыход персонального компьютера (ПК), управляющего лазерным измерителем перемещений. На ПК формируется сигнал требуемой формы и попадает на аудиовыход, затем усиливается до требуемой амплитуды напряжения и попадает на пьезоактюатор.

Проектирование, сборка, юстировка и отладка на начальном этапе двухволнового лазерного интерферометра производились в лаборатории, не оборудованной датчиками для снятия метеопрофиля трассы. Для учёта метеоусловий программным обеспечением, управляющим измерениями, использовался термогигрометр.

В ходе проведения испытаний двухволнового лазерного интерферометра были получены следующие результаты, представленные в таблице и на рис. 3.

Таблица 1

№	Наименование метрологической характеристики	Измеренное значение
1	Среднее квадратическое отклонение результата серии из N измерений начального положения каретки	0,04 мкм
2	Среднее квадратическое отклонение результата серии из N измерений конечного положения каретки	0,08 мкм
3	Среднее квадратическое отклонение результатов измерения длины отрезка	2,5 мкм
4	Разность оптических путей для двух длин волн — 532 и 1064 нм	максимальное значение — 4 мкм

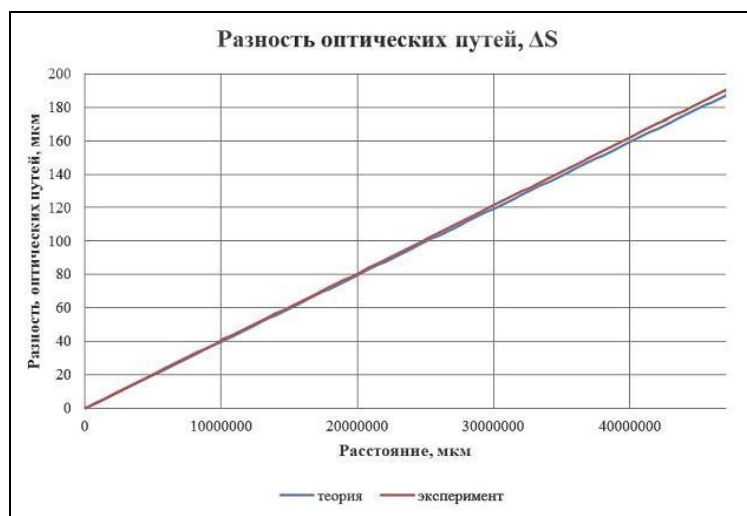


Рис. 3. Разность оптических путей для двух длин волн — 532 и 1064 нм

Полученные результаты показали, что при законченном перемещении обеспечивается разрешение положения отражателя до 0,01 мкм, а в процессе перемещения — до 0,05 мкм.

Заключение

В ходе выполнения работы был создан узел привода отражателя короткого плеча двухволнового интерферометра для регистрации дробных частей интерференционных полос, также обоснована необходимость его добавления в оптическую схему. Узел работает в режиме ручного включения с минимальным участием оператора, позволяет внести в оптическую схему требуемый псевдошумовой сигнал с возможностью его изменения.

Разработанный узел позволяет регистрировать дробные части интерференционных полос, и при проведении столь прецизионных измерений возникла необходимость изменения микроклимата лаборатории. Основной вклад в неопределённость измерений внесли температурные погрешности.

Применение псевдослучайного перемещения опорного плеча интерферометра с накоплением позволило обеспечить разрешение положения отражателя при отсутствии перемещения до 0,01 мкм, а при перемещении — до 0,05 мкм.

Литература

1. Прилепин М.Т. Определение показателя преломления воздуха при изменении расстояний светомодуляционными дальномерами // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 1957. — Вып. 2. — С. 123–132.
2. Bender P.L., Owens J.C. Correction of optical distance measurements for the fluctuating atmospheric index of refraction // J. Geophys. Res. — 1965. — V. 70. — P. 2461–2462.
3. Прилепин М.Т. О новом способе вычисления рефракции с использованием дисперсии света // Труды ЦНИИГАиК. — 1957. — Вып. 114. — С. 127.

Статья поступила в редакцию: 14.09.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 17.09.2021 г.

Статья принята в работу: 20.09.2021 г.