

УДК 006.92:531.715.1

ТРАНСПОРТИРУЕМЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

В.М. Епихин, Е.А. Лавров, М.М. Мазур, Ю.А. Судденок, В.Н. Шорин

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.,
e-mail: chorin@vniiftri.ru, e-mail: epikvm@mail.ru

Дается описание и приводятся результаты испытаний разрабатываемого транспортируемого лазерного интерферометра на короткой и длинной дистанции до 60 м.

Ключевые слова: лазерный интерферометр, метрологические характеристики, передача единицы длины.

Введение

Транспортируемый лазерный интерферометр (ИЛТ) предназначен для решения актуальной задачи - передачи размера единицы длины от государственного первичного эталона единицы длины – метра ГЭТ 2-2010 [1] стационарному комплексу метрологического обеспечения средств измерения длины в интересах достижения тактико-технических характеристик системы ГЛОНАСС, специальным и вторичным эталонам, работающим в диапазоне до 60 метров. ИЛТ использует базис для перемещения уголкового отражателя, входящий в состав этих эталонов.

Создаваемый транспортируемый лазерный интерферометр должен обеспечить следующие метрологические характеристики: неисключенная систематическая погрешность измерения длины перемещения на базисе до 60 м - не более 10 мкм; среднеквадратичное случайное отклонение результата измерений длины в диапазоне до 60 м - не более 10 мкм.

Для обеспечения необходимых параметров компенсации влияния окружающей среды на точность линейных измерений интерферометрическим способом в состав ИЛТ входит метеостанция, включающая 3 датчика температуры (абсолютная погрешность 0,02°C), датчик давления (абсолютная погрешность 0,05%), датчик влажности (абсолютная погрешность 2%) и датчик концентрации CO₂ (абсолютная погрешность 10%).

Наличие такого прибора в составе стационарного комплекса метрологического обеспечения средств измерения длины в диапазоне до 60 м позволит увеличить надежность передачи единицы длины в высших звеньях поверочной схемы.

Оптическая схема транспортируемого интерферометра

Транспортируемый лазерный интерферометр строится по схеме интерферометра Майкельсона. Оптическая схема созданного интерферометра представлена на рис.1.

Линейно поляризованное излучение высокостабильного лазера при помощи пластинки $\lambda/4$ I преобразуется в излучение с круговой поляризацией.

Далее световой пучок при помощи расширителя пучка 2 увеличивается в диаметре для обеспечения необходимой величины дифракционной расходи-

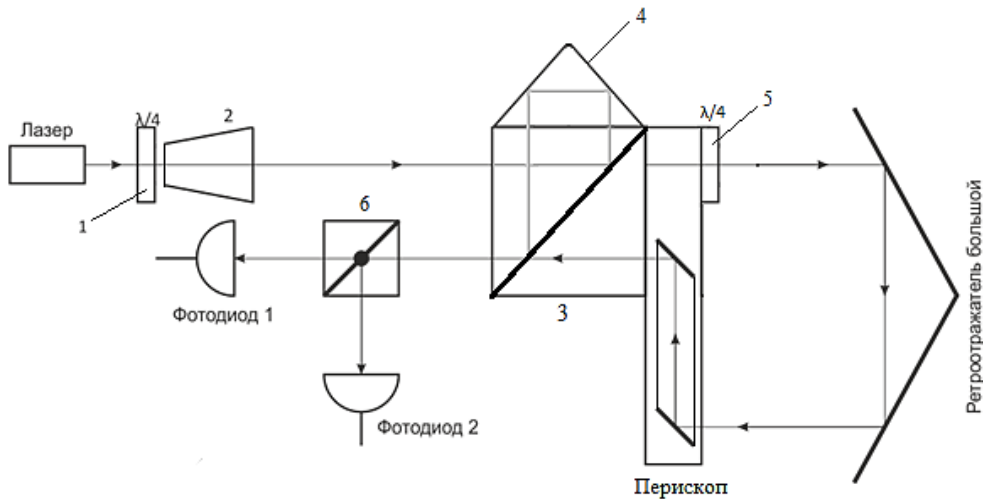


Рис. 1. Оптическая схема одноволнового транспортируемого интерферометра с неполяризационным разделением световых пучков

мости пучка. Неполяризационный светоделитель 3 разделяет пучок на два пучка, в каждом из которых присутствует компонента излучения с s и p поляризацией. Один пучок направляется в опорное плечо интерферометра и возвращается в светоделительный куб малым ретроотражателем 4, другой - в плечо измерения перемещений «большого» уголкового отражателя. Для обеспечения возможности реверсивного счета интерференционных полос в измерительном плече интерферометра установлена фазовая пластинка $\lambda/4$ 5, обеспечивающая фазовый сдвиг $\pi/2$ между компонентами излучения с s и p поляризацией. Световой пучок, распространяющийся в измерительном плече интерферометра, после отражения от перемещаемого уголкового отражателя через перископ снова попадает в светоделительный куб 3, где происходит его интерференция с пучком света, распространяющимся в опорном плече интерферометра. При поляризационном разделении интерферирующих пучков поляризационным светоделительным кубом 6 фотодиодами 1 и 2 регистрируются две интерферограммы, сдвинутые по фазе на $\pi/2$. Счет интерференционных полос с учетом этих двух сигналов позволяет учитывать истинное направление движения ретроотражателя и исключить возможные вибрации и шумы из счета интерференционных полос. Общая идея реверсивного счета интерференционных полос известна как минимум с 60 годов прошлого века, см. например, работу [2], однако ее реализация может быть выполнена на современной элементной базе.

Проверка стабильности показаний ИЛТ в течение длительного времени на короткой дистанции в неподвижном состоянии

В качестве тестовой операции для ИЛТ было проведено измерение влияния метеоусловий окружающей среды на показания интерферометра в покое длительный промежуток времени. Для этого в лаборатории было произведено измерение показания ИЛТ с неподвижным уголковым отражателем. Основной оптический блок макета ИЛТ располагался на оптическом столе, короткое плечо интерферометра и ретротражатель – на чугунном рельсе длиной 2 м. Расстояние между коротким плечом и ретроотражателем составляло 1,55 м. Не меняя расстояния длинного плеча интерферометра, было произведено измерение показания ИЛТ. Эксперимент проводился в течение 17 часов. За это время произошло уменьшение температуры в лаборатории на 0,55°C, увеличение давления на 1155 Па и увеличение влажности воздуха на 0,57%. Графики зависимости показания ИЛТ без учета и с учетом поправки на метеорологические условия в зависимости от времени представлены на рис.2-3 соответственно.

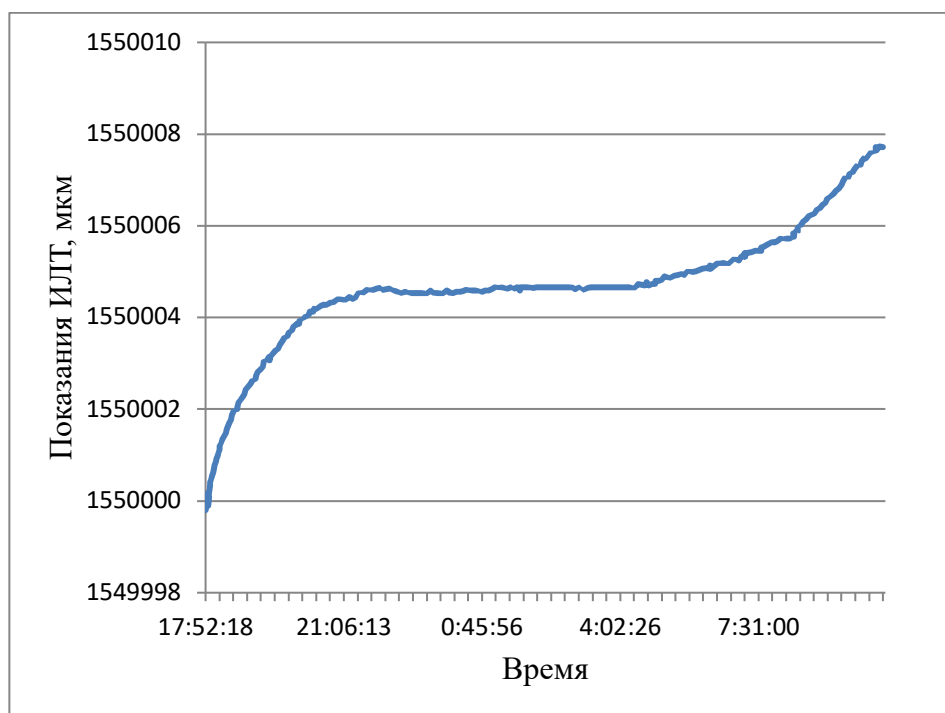


Рис.2. График зависимости показания ИЛТ от времени без учета поправки на метеорологические условия

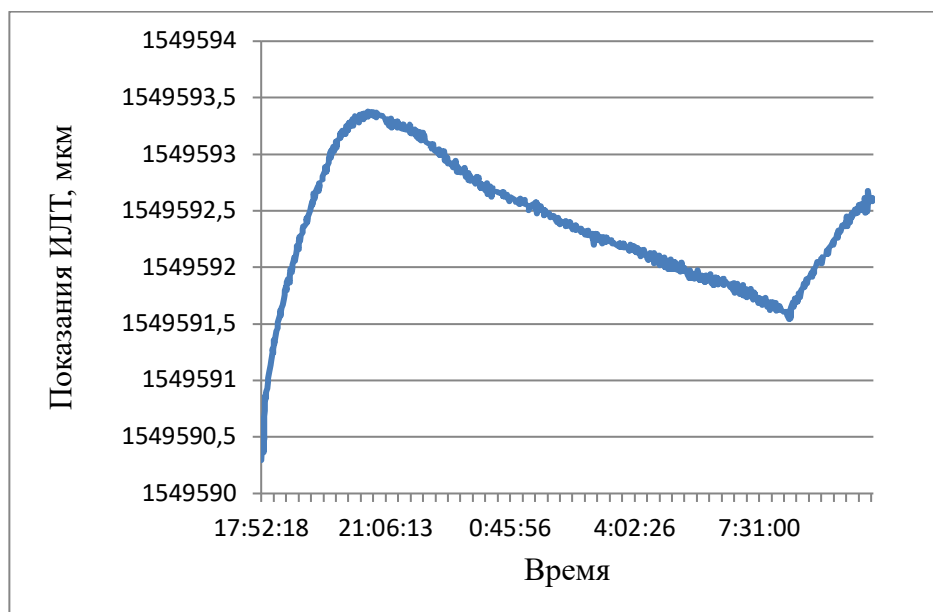


Рис.3. График зависимости показаний ИЛТ от времени с учетом поправки на метеорологические условия

Как видно из рис. 2, 3, диапазон изменения показаний ИЛТ уменьшился с ≈ 8 мкм до ≈ 3 мкм при учете поправки на метеоусловия. Наблюдаемый остаточный дрейф показаний ИЛТ можно объяснить изменением длины чугунного рельса, на котором устанавливался уголкового отражатель, при изменении температуры воздуха в процессе измерений.

Проведенные эксперименты показали работоспособность макета ИЛТ на коротком базисе.

Испытание ИЛТ на измерительном базисе ВНИИФТРИ

С целью экспериментальной отработки макета ИЛТ, подтверждения правильности выбранных технических решений, оценки метрологических характеристик интерферометра было произведено испытание макета ИЛТ на измерительном базисе эталона длины ВНИИФТРИ. Фотография установленного макета представлена на рис. 4.

На рис. 4: слева располагается макет ИЛТ на измерительной линии, далее - перемещаемая измерительная каретка с уголковыми отражателями, справа на столе – блок питания и блок управления лазером, ноутбук, система сбора метеопараметров вместе с датчиками давления и влажности. Температурные датчики располагаются вдоль измерительной линии справа.

Сравнение результатов измерений положений ретроотражателя ИЛТ с

эталонным измерителем перемещений происходило по двум оптическим схемам.

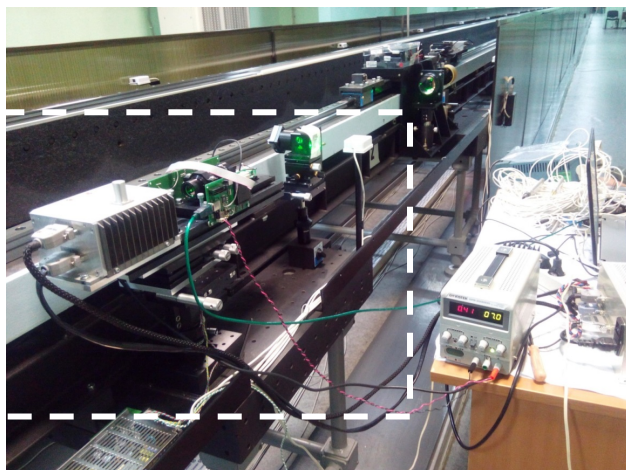


Рис. 4. Макет ИЛТ на измерительном базисе эталона длины ВНИИФТРИ
(макет выделен прямоугольником)

В первой оптической схеме ИЛТ разместили на одном конце измерительного базиса параллельно измерительному интерферометру XL-80 Renishaw. На рис. 5 приведена схема сличений ИЛТ с Renishaw, расположенных параллельно друг другу на измерительном базисе.

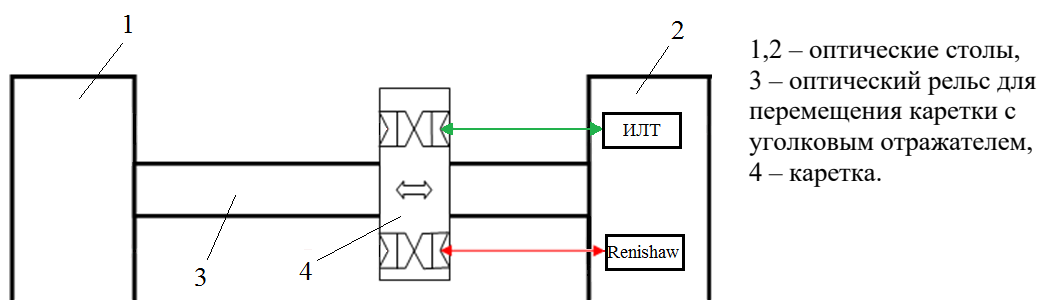


Рис. 5. Схема сличений ИЛТ с Renishaw, расположенных параллельно друг другу на измерительном базисе

Каретку перемещали по 10 отрезков на дистанции около 58 м. После каждого отрезка каретка останавливалась и записывались показания положений ретроотражателя и эталонного измерительного интерферометра XL-80 Renishaw. Эти данные, зарегистрированная длина отрезков каждого из приборов, а также разница между показаниями ИЛТ и Renishaw представлены в табл. 1 и рис. 6.

Таблица 1

Renishaw, мкм	ИЛТ, мкм	Δ Renishaw, мкм	Δ ИЛТ, мкм	ΔR - Δ ИЛТ, мкм
5607936	5607956	5607936	5607956	-20
11215601	11215646	5607665	5607690	-25
16824542	16824544	5608941	5608898	43
22432588	22432532	5608046	5607988	58
28041192	28041191	5608604	5608659	-55
33649717	33649743	5608525	5608552	-27
39258718	39258761	5609001	5609018	-17
44867857	44867910	5609139	5609149	-10
50476840	50476896	5608983	5608986	-3
58249282	58249286	7772442	7772390	52

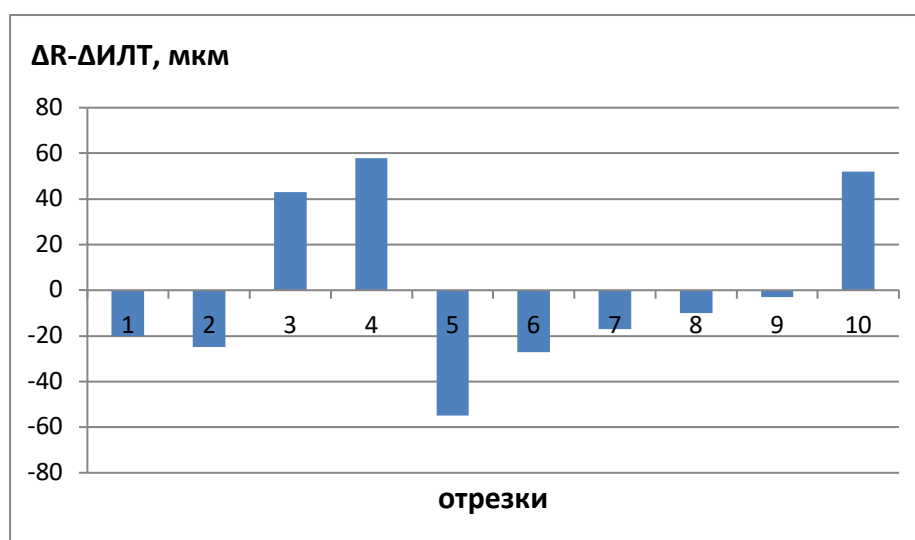


Рис. 6. Разность показаний между ИЛТ и Renishaw, расположенных параллельно друг другу на измерительном базисе

Такое значительное расхождение в показаниях интерферометров можно объяснить несоблюдением принципа Аббе вследствие перекосов движущейся каретки [3].

Во второй оптической схеме измерения для исключения ошибки Аббе измерительные лучи ИЛТ и Renishaw XL-80 были направлены на уголковые отражатели измерительной каретки соосно и навстречу друг другу, как это обычно делается при поверке приборов. Схема измерений приведена на

рис. 7. Результаты сличений представлены в табл. 2 и на рис. 8.

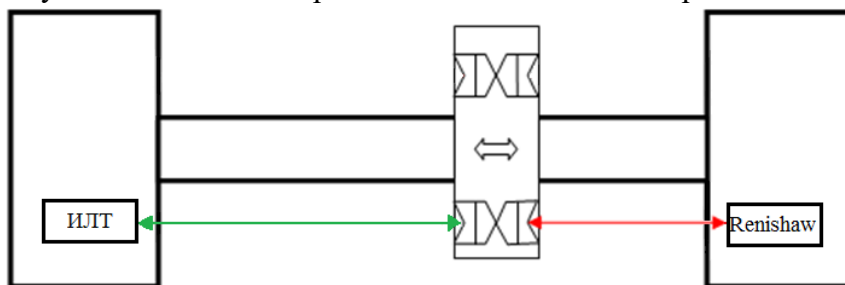


Рис. 7. Схема сличений ИЛТ с Renishaw, расположенных навстречу друг другу на измерительном базисе

Таблица 2

	ИЛТ, мкм	Отрезки, мкм	Renishaw, мкм	Отрезки, мкм	Δ , мкм
	5725284.08		5821146.6		0
	11549548.2	5824264.12	11645414.4	5824267.8	3.68
	17374169.32	5824621.12	17470033.7	5824619.3	-1.82
	23198871.01	5824701.69	23294735.2	5824701.5	-0.19
	29023433.74	5824562.73	29119298.7	5824563.5	0.77
	34848991.81	5825558.07	34944859.5	5825560.8	2.73
	40674134	5825142.19	40770001.5	5825142	-0.19
	46499512.27	5825378.27	46595378	5825376.5	-1.77
	52324713.6	5825201.33	52420581.6	5825203.6	2.27
	58150008.15	5825294.55	58245870.1	5825288.5	-6.05
Без остановок	58245464		58245465.7		1.7

Среднеквадратичное отклонение разницы показаний интерферометров равно 2,79 мкм, что удовлетворяет требованиям поставленной задачи. При вычислении положений ретроотражателя в двух приборах использовались данные метеодатчиков Renishaw.

На следующем этапе при второй оптической схеме использовалась система сбора собственных метеопараметров ИЛТ. Датчики давления и влажности расположили в начале измерительной линии. Температурные датчики расположили вдоль измерительной линии справа. Схема расположения датчиков приведена на рис. 9. Результаты сличений приведены в табл. 3 и на рис. 10. В каждом измерителе перемещений использовались данные метеопараметров своих датчиков.

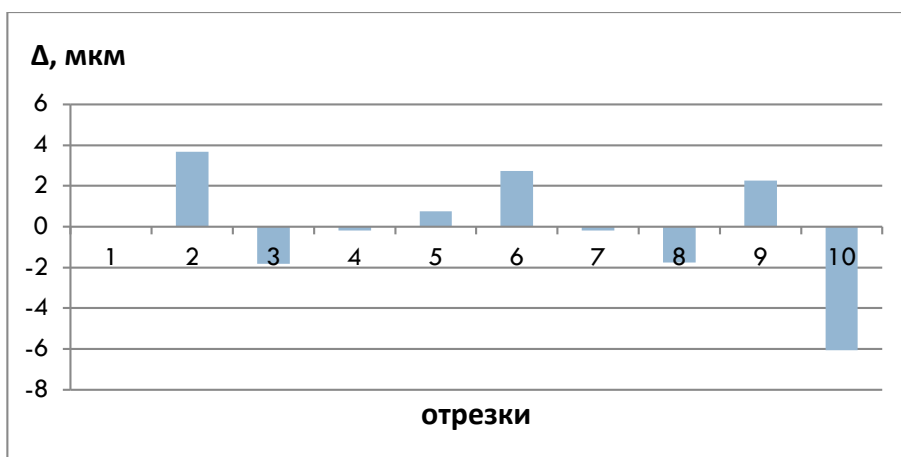


Рис. 8. Разность показаний между ИЛТ и Renishaw, расположенных навстречу друг другу на измерительном базисе

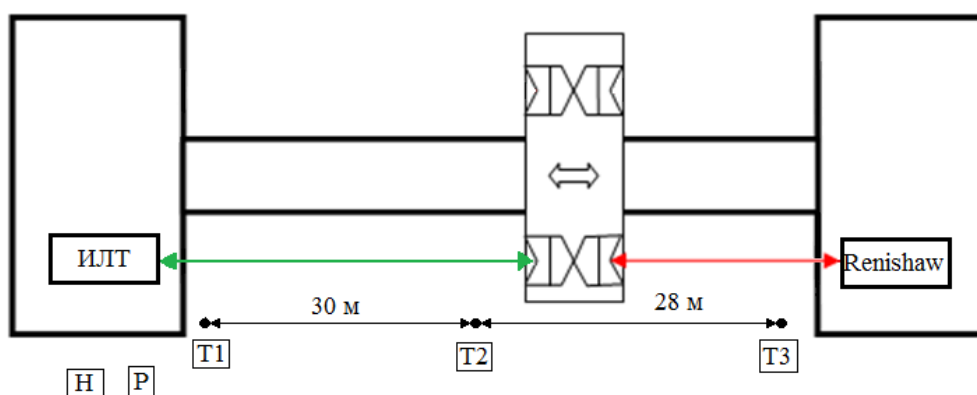


Рис. 9. Схема расположения датчиков на измерительном базисе

При уменьшении дистанции среднее арифметическое значение разницы измеренных отрезков двух интерферометров равно 0,55 мкм, а среднеквадратичное отклонение 2,74 мкм. При увеличении дистанции среднее арифметическое значение разницы измеренных отрезков двух интерферометров равно 0,43 мкм, а среднеквадратичное отклонение 3,04 мкм.

При сравнении подобных отрезков положений ретроотражателя, сделанных в разные дни и с использованием собственных данных метеопараметров для каждого интерферометра, можно заметить повторяемость расхождений положений, измеренных ИЛТ, и положений, измеренных измерителем перемещений Renishaw (рис. 11, 12). Этот эффект, воз-

можно, связан с систематическими проявлениями локальных отклонений реального измерительного базиса от идеально прямолинейного.

Таблица 3

Уменьшение дистанции					Увеличение дистанции				
Renishaw, мкм		ИЛТ, мкм		Δ, мкм	Renishaw, мкм		ИЛТ, мкм		Δ, мкм
5822927.5	5822927.5	5822932.2	5822932.2	-4.7	5821456.2	5821456.2	5821455	5821455	1.2
11646640.7	5823713.2	11646645	5823712.8	0.4	11645768.9	5824312.7	11645762	5824307	5.7
17470373.2	5823732.5	17470379	5823734	-1.5	17470187.6	5824418.7	17470183	5824421	-2.3
23296172.6	5825799.4	23296176	5825797	2.4	23295185.6	5824998	23295182	5824999	-1
29119583.7	5823411.1	29119583	5823407	4.1	29119821.7	5824636.1	29119816	5824634	2.1
34944744.7	5825161	34944742	5825159	2	34945102.8	5825281.1	34945094	5825278	3.1
40770044.4	5825299.7	40770041	5825299	0.7	40770305.9	5825203.1	40770297	5825203	0.1
46594905.5	5824861.1	46594905	5824864	-2.9	46595723.4	5825417.5	46595717	5825420	-2.5
52420621.2	5825715.7	52420617	5825712	3.7	52420963.2	5825239.8	52420954	5825237	2.8
58246517.5	5825896.3	58246512	5825895	1.3	58246261.3	5825298.1	58246257	5825303	-4.9



Рис. 10. Разность показаний между ИЛТ и Renishaw, измеренные в один день при а) уменьшении и б) увеличении дистанции

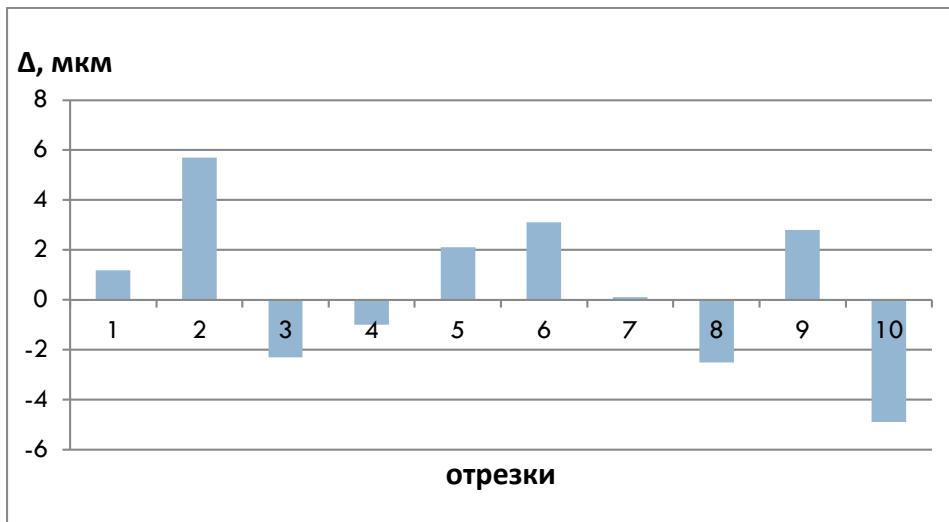


Рис. 11. Разность показаний между ИЛТ и Renishaw с использованием метеопараметров Renishaw

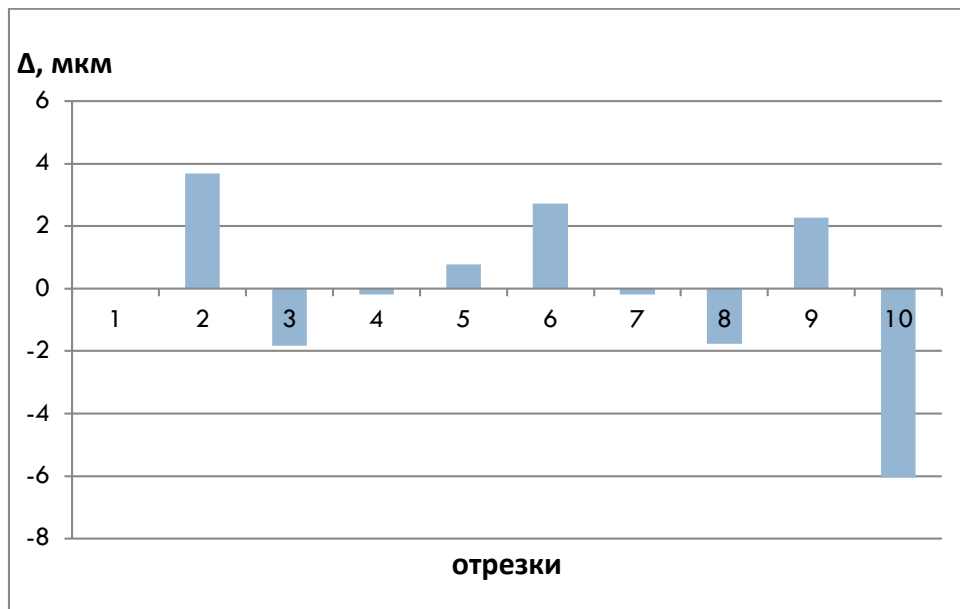


Рис. 12. Разность показаний между ИЛТ и Renishaw с использованием собственных данных метеопараметров, измеренных спустя неделю

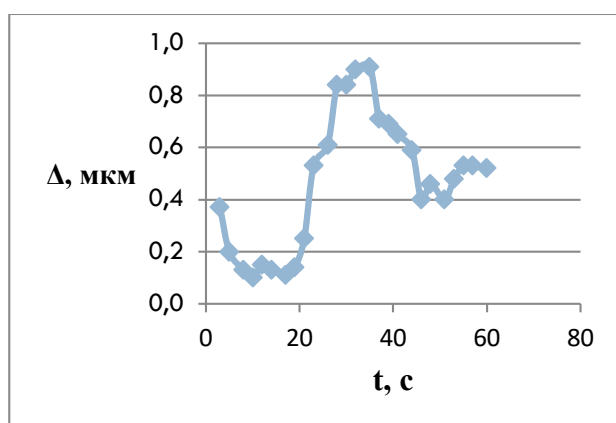
При использовании одноволновой схемы ИЛТ для точного нахождения среднеинтегрального группового показателя преломления необходима информация о метеопараметрах вдоль всей трассы, получение которой является

Альманах современной метрологии, 2015, №4

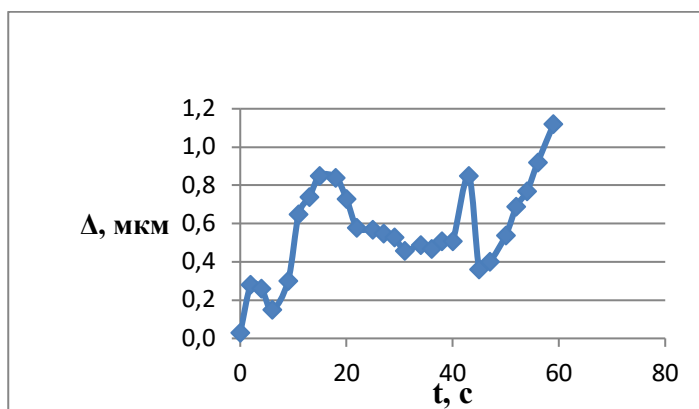
ся весьма сложной или даже неразрешимой задачей. Отличие же используемых моделей распределения давления, температуры и влажности от реальности является источником систематических ошибок измерения дальности.

Известно, что двухволновая схема интерферометра для измерения величины перемещения позволяет повысить точность измерения перемещения или упростить требования к измерению метеопараметров на трассе перемещения.

Двухволновый метод измерения дальности позволяет существенно снизить эти ошибки. Этот метод для приземных трасс и источников амплитудно-модулированного света был впервые предложен в 1956 г. М. Т. Прилепным [4,5] (позднее, в 1965 г., этот же метод был независимо разработан в США П. Бендером и Д. Оуэнсом [6]). Идея метода 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. При этом достаточно знать информацию о влажности и температуре лишь на концах линии.



а



б

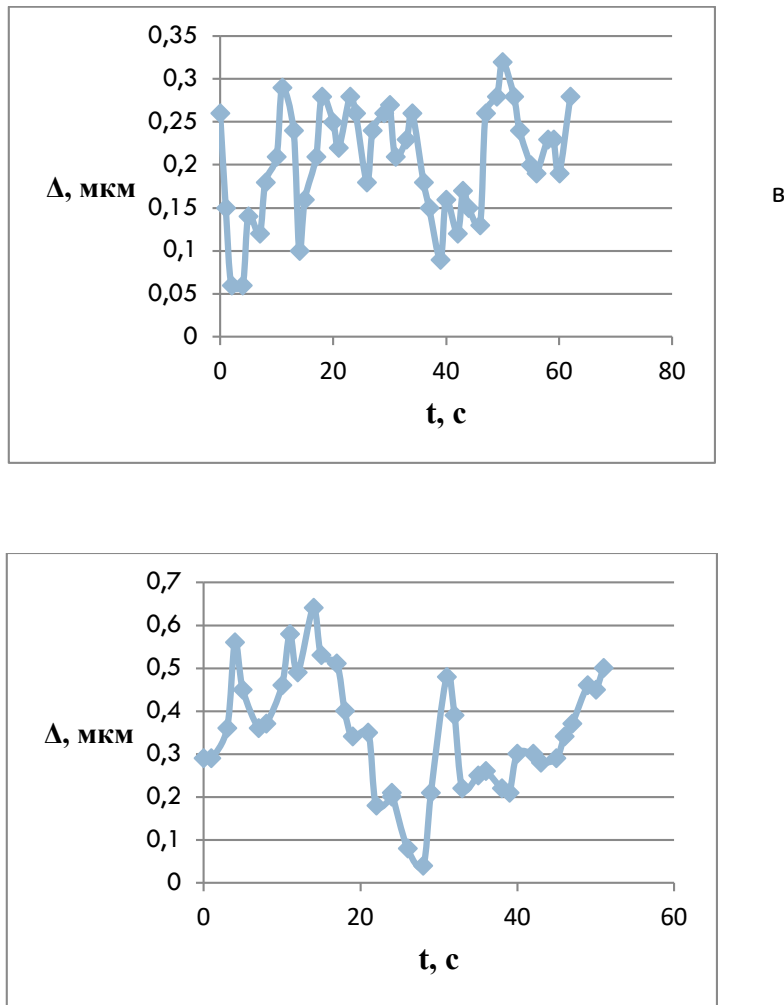


Рис. 13. Дрейф показаний ИЛТ с кареткой в положении покоя

При двухволновом дисперсионном методе для успешного использования ИЛТ должна быть отработана система измерения оптической разности хода для двух длин волн с погрешностью около $1/16\lambda$. Для оценки возможности выполнения этого требования были произведены измерения величины показаний ИЛТ при остановке каретки (рис. 13).

Рассмотрим в качестве примера график на рис.13 в). Для него среднее арифметическое значение дрейфа показаний ИЛТ равно 0,2 мкм, а средне-квадратичное отклонение - 0,21 мкм.

Следовательно, для достижения требуемой точности измерения оптической разности хода для двух длин волн ($\approx 0,03$ мкм) необходимо уменьшение

погрешности ИЛТ на порядок. Возможно, при одновременном счете полос для двух длин волн удастся достигнуть необходимой точности.

Заключение и выводы

В работе описаны результаты испытаний разрабатываемого транспортируемого лазерного интерферометра на короткой и длинной дистанциях до 60 метров.

Среднее значение разницы показаний разрабатываемого ИЛТ и измерителя перемещений Renishaw на дистанции около 58м $\approx 0,5$ мкм. Среднеквадратичное отклонение разницы показаний интерферометров ≈ 3 мкм.

При сравнении длин одноименных отрезков между ИЛТ и измерителем перемещений Renishaw, измеренных в разные дни, замечена повторяемость результатов для одноименных отрезков. Возможная причина этого эффекта – неидеальная прямолинейность измерительного базиса.

Амплитуда шумовой дорожки величины показаний ИЛТ с учетом поправки на метеорологические условия на короткой дистанции в покое составляет доли микрометра, что позволяет предположить, что при одновременном измерении на двух длинах волн можно будет достичь разрешения счета полос менее $1/16 \lambda$.

В заключение хотелось бы выразить благодарность коллективу лаборатории НИО-8 за помощь в эксплуатации измерительного базиса эталона длины ВНИИФТРИ.

Литература

1. Александров В.С., Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Лейбенгардт Г.И., Федорин В.Л., Чекирда К.В. Государственный первичный эталон единицы длины — метра ГЭТ 2 - 2010 // Измер. техника, 2012, № 6, с.3-6.
2. Кирьянов В.П., Клисторин И.Ф., Щербаченко А.М. Электронное устройство счета и регистрации для лазерного измерителя перемещений. // Автоматрия, 1971, № 1, с. 21-35.
3. Городецкий Ю.Г. Конструкции, расчет и эксплуатация измерительных инструментов и приборов. - М.: Машиностроение, 1972.
4. Прилепин М.Т. - Труды ЦНИИГАиК, вып.114, 1957, с. 127.
5. Прилепин М.Т. Геодезия и аэрофотосъемка. // Изв. ВУЗов, 1957, вып.2.
6. Bender P.L., Owens J.C. // Geophys J. Res., 70, 1965, p. 2461.