

Дистанционное сличение линейных мер

А. Г. ДАНЕЛЯН, Г. В. ДАТИАШВИЛИ, Ю. П. МАЧЕХИН, Д. И. ГАРИБАШВИЛИ,
В. А. ДАНЕЛЯН

Предложено применение оптического циркулятора для калибровки (поверки) линейных мер частотным способом. Рассмотрена возможность дистанционного частотного сличения линейных мер, которые расположены в разнесенных лабораториях.

Ключевые слова: частотное измерение длины, линейная мера, оптический циркулятор, дистанционное сличение.

The application of the optical circulator for calibration (verification) of linear measures by frequency method is offered. The opportunity of remote comparisons of linear measures by frequency is considered which are located in the remote laboratories. It is expected that the error of such comparison will not exceed an error of comparisons of the linear measures by known optical interferometric methods.

Key words: frequency measurement of length, linear measure, optical circulator, distance comparison.

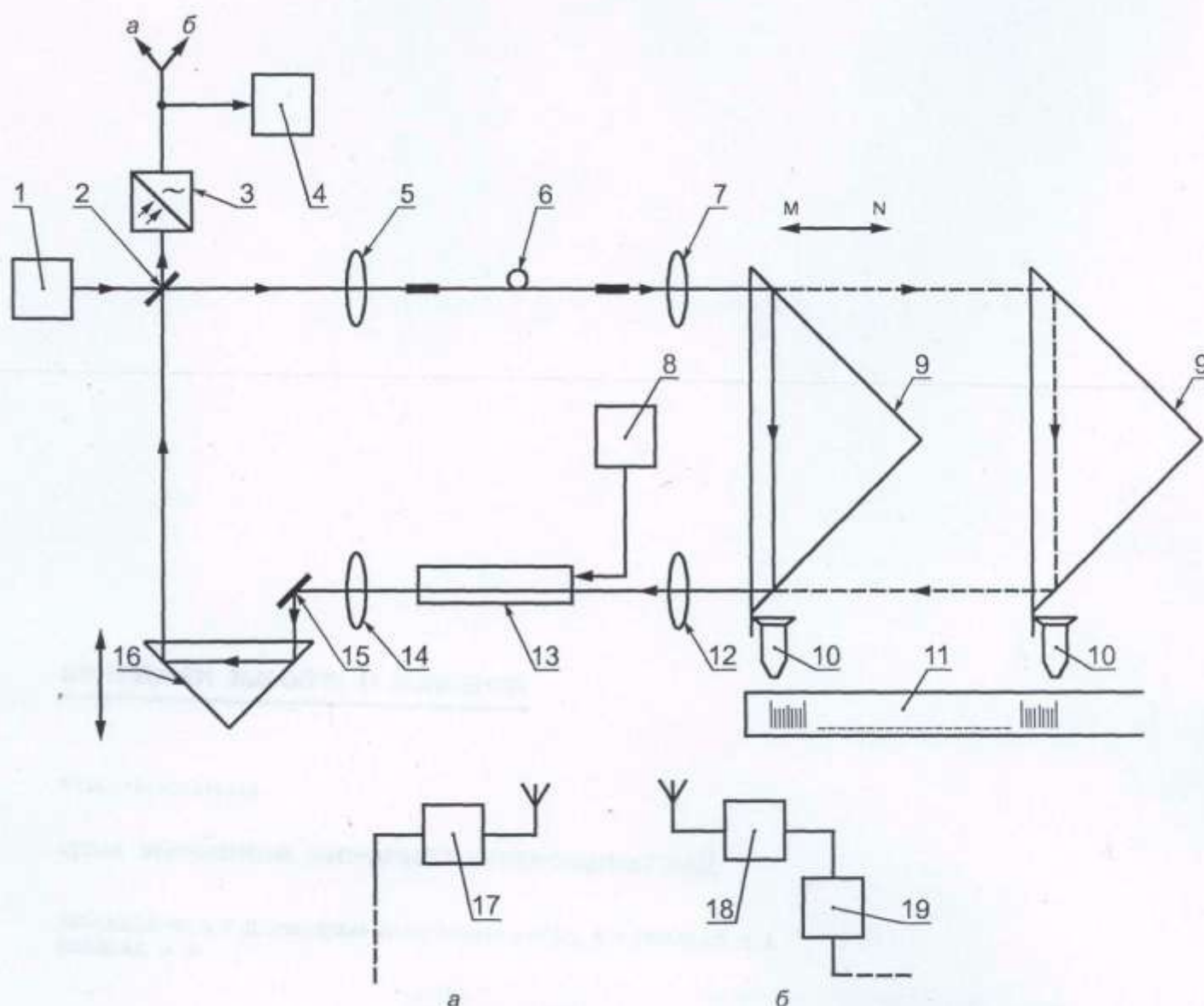
В работе [1] был затронут вопрос о возможности применения оптического циркулятора для решения задач измерительной техники. В данной статье более подробно проанализированы указанные возможности для частотных измерений длин линейных мер.

Напомним, что под оптическим циркулятором понимается замкнутый оптический контур, включающий в себя односторонний оптический усилитель (компенсатор потерь интенсивности света в контуре) [1]. Если в контур ввести ко-

роткий одиночный импульс света, то, перемещаясь со скоростью света в этом контуре, этот импульс будет циркулировать с частотой $f = c/l$, определяемой оптической длиной контура циркуляции l и интегральной скоростью распространения света в контуре c .

Структурная схема устройства на основе циркулятора для измерения длин линейных мер представлена на рисунке.

Измеряемую длину можно определять при изменении положения поворотной призмы 9, перемещаемой парал-



Структурная схема устройства:

1 — источник короткого одиночного оптического импульса; 2 — полупрозрачное зеркало (светоделитель); 3 — выходной фотоприемник циркулятора; 4 — измеритель частоты импульсов в циркуляторе; 5 и 7 — входной и выходной объективы, обеспечивающие ввод импульса в световод 6 и вывод импульса из этого световода в контур циркуляции; 6 — дополнительный световод (для увеличения длины контура циркуляции); 8 — система накачки оптического усилителя; 9 — подвижная поворотная призма контура циркулятора; 10 — тубус микроскопа с объективом, механически жестко связанный с подвижной призмой 9 циркулятора; 11 — исследуемая или проверяемая линейная мера; 12 и 14 — входной и выходной объективы, обеспечивающие ввод импульса в оптический усилитель и вывод импульса из усилителя в контур циркуляции; 13 — оптический усилитель; 15 — отражающее зеркало; 16 — вспомогательная подвижная поворотная призма в контуре циркулятора; 17 — передатчик; 18 — приемник; 19 — компаратор частот

лельно вдоль оси MN , по изменению частоты циркуляции импульса f в контуре [1]. При этом для измерения длины необходимо привести на начало измеряемого объекта (допустим, на нулевую отметку измеряемой линейной меры) риску объектива микроскопа 10 (или другого аналогичного приспособления), с которым должна быть жестко связана призма 9. Этому положению призмы 9 будет соответствовать некоторая частота f_1 циркуляции импульса в контуре. Затем риску объектива микроскопа 10 перемещением призмы 9 наводят на конец измеряемого объекта. Такой установке призмы 9 будет соответствовать новая частота f_2 циркуляции импульса в контуре. Искомое значение длины определяется выражением

$$\Delta l = \frac{c}{2n} \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} \right) = \frac{c(f_1 - f_2)}{2nf_1 f_2}, \quad (1)$$

где c — скорость света; n — показатель преломления на участке циркуляционного контура, по которому перемещают призму 9.

Таким образом, оптический циркулятор может обеспечить частотное измерение длины. Если, например, начальная длина контура (при «нулевом» положении призмы 9) равна 60 м, то частота циркуляции импульса будет порядка 5 МГц. Эту частоту можно измерить цифровым частотомером (например типа ЧЗ-64) с погрешностью и разрешающей способностью 0,01 Гц. Следовательно, чувствительность

оптического циркулятора к изменению длины составляет около 10^{-8} , что не хуже, чем в оптических интерференционных методах измерения длины в диапазоне 1—10 м. Отметим, что с привязкой (синхронизацией) к стандарту частоты и с использованием частотных компараторов эти измерения частоты, а в нашем случае и длины, можно осуществить с еще более высокой разрешающей способностью.

Рассмотрим дополнительную подвижную призму 16 (см. рисунок). В начале процесса измерения (калибровки) линейной меры при установке объектива микроскопа 10 в «нулевое» положение перемещением призмы 16 можно установить значение начальной частоты f_1 циркуляции импульса, равное какому-либо удобному или стандартному значению частоты (например, 1; 5 или 10 МГц). Затем эту призму неподвижно фиксируют и дальнейшее измерение осуществляют перемещением призмы 9.

Рассмотренная схема является, на наш взгляд, одной из тех немногих схем, которая может позволить практически реализовать возможность дистанционного сличения (калибровки) линейных мер. Проблема дистанционного сличения мер с эталонами возникла в 1969 г. К ее решению приступили специалисты Тбилисского филиала ВНИИМ им. Д. И. Менделеева [2]. Идея базировалась на том, что в тот период практически уже производили дистанционное сличение мер частоты. Развив частотные методы измерений, предлагалось осуществить возможность дистанционного сличения мер других физических величин. В начале 70-х гг. было предложено несколько способов и устройств дистанционного сличения линейных и угловых мер [3—6]. Но все эти предложения и исследования были вскоре остановлены, поскольку практически во всех предложенных устройствах ключевыми узлами, последовательно включенными в схему, оказались электронные или оптоэлектронные элементы, инерционность которых и неопределенность временных характеристик приводили к неоправданно большим погрешностям (не было возможности достичь требуемой точности для сличения мер). В рассмотренной схеме циркулятора ее элементы такого ограничения не вносят. Дистанционное сличение линейной меры с эталоном (посредством частоты) можно осуществить, если одинаковые установки, как на рисунке, будут расположены в пункте, где находится эталон, с которым должны сличать поверяемую меру, и в удаленном пункте, где необходимо калибровать (поверять) меру.

Для осуществления дистанционного сличения на пункте, где расположена линейная мера (стандарт), необходимо на выходе фотоприемника 3 установить передатчик 17, передающий по каналу связи (радиоканалу, волоконно-оптическому каналу и т. п.) частоту циркуляции импульсов в контуре циркуляции (на рисунке отдельно изображена цепь а).

На удаленном пункте, на котором поверяют (калибруют) исследуемую меру, помимо устройства циркулятора (элементы 1—16 на рисунке), должны быть дополнительно включены в схему приемник сигналов 18, передаваемых с первого пункта, а также компаратор частот 19 (на рисунке отдельно показана цепь б).

Исходя из этого отметим, что на один из входов компаратора частот 19, установленного на приемном (втором) пункте, подаются сигналы с выхода фотоприемника 3, а на второй вход этого компаратора подаются сигналы с выхода приемника 18.

Кратко изложим последовательность операций при сличении линейных мер в вариантах а и б.

Сначала на первом пункте (вариант устройства с подключением цепи а), где установлена исходная образцовая линейная мера (стандарт), перемещением призмы 9 риску объектива микроскопа 10 наводят на «нулевой» штрих линейной меры 11, а перемещением призмы 16 устанавли-

вают значение частоты циркуляции импульсов в контуре циркуляции, равное какому-либо стандартному значению частоты f_1 (например, 5 МГц). На втором пункте (вариант устройства с подключением цепи б) перемещением призмы 9 риску объектива микроскопа 10 наводят на «нулевой» штрих линейной меры 11. Перемещением призмы 16 с использованием компаратора частот 19 в контуре циркуляции на втором пункте устанавливают значение частоты, также равное f_1 .

После этого на первом пункте перемещением призмы 9 риску объектива микроскопа 10 наводят на следующий штрих линейной меры 11. При этом в контуре циркулятора первого пункта устанавливается частота циркуляции f_2 . Она передается через канал связи на второй пункт, где перемещением призмы 9 риску объектива микроскопа наводят на соответствующий следующий штрих линейной меры 11. При этом в контуре циркуляции второго контура устанавливается частота циркуляции f_3 , в общем случае отличающаяся от частоты f_2 . Разность частот $\Delta f = f_3 - f_2$ может быть измерена компаратором частот 19.

Исходя из выражения (1), можно найти разность длин образцовой и сличаемой с ней линейных мер, определенную по измерениям частот f_3 и f_2 . Действительно, для длины Δl_1 между штрихами образцовой меры можно написать выражение

$$\Delta l_1 = \frac{c}{2n} \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} \right), \quad (2)$$

а для длины Δl_2 между соответствующими штрихами поверяемой меры —

$$\Delta l_2 = \frac{c}{2n} \left(\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1} \right). \quad (3)$$

Взяв разность выражений (3) и (2), получим значение разности длин поверяемой и образцовой линейных мер:

$$\delta(\Delta l) = \Delta l_2 - \Delta l_1 = \frac{c}{2n} \left(\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_2} \right); \quad (4)$$

$$\delta(\Delta l) = \frac{c}{2n} \frac{\Delta f}{f_2 f_3} = \frac{c}{2n} \frac{\Delta f}{(f_2 + \Delta f) f_2} = \frac{c}{2n} \frac{(\Delta f / f_2)}{f_2 (1 + (\Delta f / f_2))}. \quad (5)$$

Конечно, при анализе точностных характеристик такого сличения следует учесть погрешности наведения объектива микроскопа на начало и конец меры, а также другие факторы, которые могут возникнуть при конкретной реализации такого способа.

Из выражения (5) видно, что погрешность значения $\delta(\Delta l)$ определяется погрешностями значения: показателя преломления n , фундаментальной константы c , а также погрешностями измерений частоты f_2 и отклонения частоты Δf . При этом, если сравнить такое сличение с калибровкой линейной меры известными оптическими интерференционными методами, то влияние c и n на результат калибровки в обоих методах калибровки идентично. Частоты могут быть измерены с относительной погрешностью порядка 10^{-8} , а значение ухода частоты $\Delta f / f_2$ с применением современных компараторов частот может быть измерено с разрешающей способностью порядка $1 \cdot 10^{-12} - 1 \cdot 10^{-11}$ за 100 с. Исходя из этого, суммарная погрешность калибровки или аттестации (поверки) линейных мер по частоте описанным способом не должна превышать погрешность при проверке или аттестации линейных мер интерференционными методами.

Можно несколько упростить описанный процесс дистанционного сличения линейных мер. Для этого можно, например, принять условие, чтобы как на передающем (первом), так и на приемном (втором) пунктах начальную частоту f_1 в циркуляторах перемещением призмы 16 приводить к ста-

онарной частоте, допустим, равной $f_1 = 5$ МГц. При этом должна быть обеспечена возможность регулярного сличения этой частоты на обоих пунктах с частотой 5 МГц, связанной (синхронизированной) с эталоном частоты. В этом случае можно не передавать через канал связи частоту f_1 с первого пункта на второй, а через канал связи передавать только частоту f_2 , которая возникает в контуре циркуляции первого пункта при наведении объектива микроскопа на второй штрих образцовой линейной меры (стандарта). Эта вторая частота и будет эталонной для аттестации (калибровки) линейных мер. С ней необходимо сравнивать установленную на втором пункте в циркуляторе частоту f_3 .

Дополнительно отметим, что описанный процесс можно применить и для взаимного дистанционного сличения линейных мер, расположенных на двух разнесенных пунктах. Для этого на каждом из этих пунктов к описанному устройству циркулятора должны быть подключены одновременно обе цепи а и б. Точки подключения обеих цепей при этом указаны на рисунке.

В заключение укажем, что предложенный способ дистанционного сличения линейных мер при выполнении соответствующих исследований и стандартизации условий поверки (калибровки и измерений), на наш взгляд, может найти применение в метрологической практике. Во-первых, нет необходимости транспортировки мер для сличений с эталоном (образцовой линейной мерой), что связано с экономическими затратами и требованием сохранения транспортируемой меры от повреждения и т. д. Во-вторых, все эти сличения могут быть привязаны к эталонным частотам, которые службы частот передают по каналам связи. При этом результаты сличения, представленные также в виде частот, в случае необходимости можно передавать в вышестоящий

метрологический пункт для информации о рабочем состоянии (погрешности) отдельных экземпляров этого класса меры на втором пункте. В-третьих, для сличения этих линейных мер не требуются дорогостоящие лазеры со стабилизированной длиной волны излучения (стандарты оптической частоты) для интерференционных измерений. Лазеры также периодически необходимо аттестовывать. Хотя необходимо отметить, что в схемах циркуляторов в рассмотренном случае должны применяться дорогостоящие оптические усилители. Наверное можно говорить и о других достоинствах и недостатках предлагаемого метода. Очевидно, что все это желательно оценивать после практического использования такой системы и ее исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данелян А. Г. и др. // Измерительная техника. — 1997. — № 8. — С. 38.
2. Зедгинидзе Г. П., Гольдштейн Г. А. // Измерительная техника. — 1971. — № 2. — С. 26.
3. А. с. 347567. / Г. П. Зедгинидзе, Г. А. Гольдштейн // Бюл. изобрет. — 1972. — № 27.
4. А. с. 455239. / Г. П. Зедгинидзе, Ю. Н. Костава, В. М. Сихарулидзе. // Бюл. изобрет. — 1974. — № 48.
5. А. с. 691686. / Ю. Н. Костава // Бюл. изобрет. — 1979. — № 38.
6. Зедгинидзе Г. П., Костава Ю. Н., Сихарулидзе В. М. // Материалы III Респ. науч.-техн. конф. по метрологии (20—21 ноября 1974 г.). Ч. 1. — Тбилиси, 1974. — С. 183.

Дата одобрения 08.02.2002 г.