

07;12

Измерение линейной скорости с помощью резонансного кольцевого интерферометра с низкокогерентным источником света

© В.В. Иванов, М.А. Новиков, В.М. Геликонов

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород,
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Поступило в Редакцию 19 июля 1999 г.

Теоретически и экспериментально продемонстрирована возможность измерения линейных скоростей отражающих объектов с помощью резонансного кольцевого интерферометра с низкокогерентным источником света. Сделаны оценки предельной чувствительности такого интерферометра. Показано, что кольцевой резонансный интерферометр может быть использован для измерения очень малых линейных скоростей, соответствующих субгерцовым доплеровским сдвигам частоты света, которые не могут быть измерены традиционными доплеровскими методами, основанными на непосредственном измерении разности частот исходной и отраженной волн.

Кольцевые оптические интерферометры, традиционно используемые для измерения угловой скорости, в последние годы находят новые интересные применения в науке и технике. Так, в настоящее время активно изучаются возможности использования кольцевых интерферометров для измерения линейных скоростей и перемещений, в частности при детектировании гравитационных волн, измерении скоростей потоков жидкости [1] и линейных скоростей твердых тел [2]. По сравнению с интерферометрами, традиционно используемыми для измерения линейных перемещений, кольцевые интерферометры обладают большей помехоустойчивостью и меньшим уровнем технических шумов. Это связано с тем, что в кольцевых интерферометрах изменения оптической длины кольца вследствие взаимных оптических эффектов, например теплового расширения или механических шумов, не приводят к существенному изменению разности фаз интерферирующих волн.

В настоящей работе теоретически и экспериментально показана возможность измерения линейных скоростей объектов с помощью

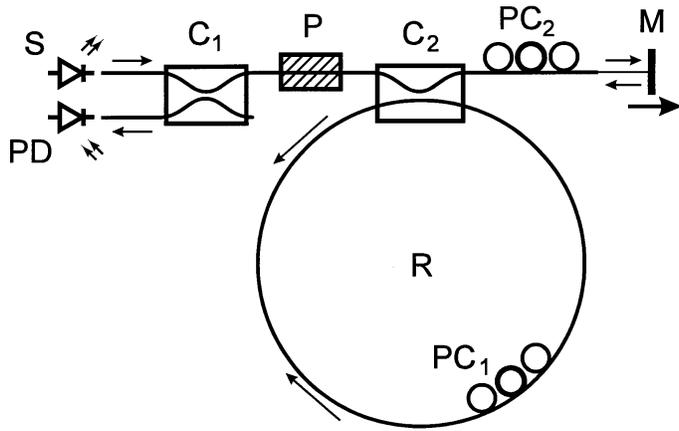


Рис. 1. Принципиальная схема резонансного кольцевого интерферометра с низкокогерентным источником света: S — источник света, C_1 — 3 дВ волоконный ответвитель, P — поляризатор, C_2 — волоконный ответвитель со слабой связью, R — кольцевой резонатор, PC_1 , PC_2 — управители поляризации, M — измеряемый объект (движущееся зеркало), PD — фотоприемник.

резонансного кольцевого интерферометра с низкокогерентным источником света [3], ранее предложенного и продемонстрированного в качестве оптического гироскопа [4]. По сравнению с интерферометром Саньяка, применявшимся для измерения линейных скоростей в [1,2], при тех же размерах кольца этот интерферометр обладает большей чувствительностью за счет многопроходной интерференции в кольцевом резонаторе.

Среди многих возможных схем кольцевых резонансных интерферометров с низкокогерентными источниками света для эксперимента нами была выбрана простейшая схема, изображенная на рис. 1. Принципиальными элементами этой схемы являются низкокогерентный источник света S , 3-дВ ответвитель C_1 , кольцевой резонатор R , замкнутый ответвителем со слабой связью C_2 , и фотоприемник PD . Измеряемый объект M представляет собой возвращающее зеркало, располагаемое на выходе ответвителя C_2 . Поляризатор P и управители поляризации PC_1 , PC_2 позволяют изолировать фотоприемник от света, отраженного от

кольцевого резонатора. Это может быть сделано следующим образом. Если за один обход кольцевого резонатора поляризация света поворачивается на $\pm 90^\circ$ (знак зависит от направления обхода кольца), то матрица Джонса такого резонатора в схеме (рис. 1):

$$\hat{T}^\pm = \left(R^{1/2} - (1-R)(1-R^{1/2} \exp(i\varphi^\pm)) \frac{R \exp(i\varphi^\pm)}{1 + R \exp(i2\varphi^\pm)} \right) \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} + \frac{R^{1/2}(1-R) \exp(i\varphi^\pm)}{1 + R \exp(i2\varphi^\pm)} \begin{vmatrix} 1 & \mp 1 \\ \pm 1 & 1 \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где "+" и "-" соответствуют обходу резонатора по часовой стрелке и против часовой стрелки, R — коэффициент отражения (доля неответвляемой мощности) ответвителя C_2 (в высокодобротном резонаторе $1 - R \ll 1$), φ — набег фазы световой волны за полный обход резонатора. Коэффициент при изотропной матрице содержит член $R^{1/2}$, не несущий информации о фазовых набеге в резонаторе. Чтобы исключить фоновую засветку, связанную с этим членом, из двух слагаемых (1) следует выделить второе. Этого можно достичь, сделав отрезок от поляризатора P до ответвителя C_2 изотропным, а отрезок от ответвителя C_2 до возвращающего зеркала M — эквивалентным четвертьволновой пластине, повернутой на 45° относительно поляризатора P . В этом случае поляризатор пропускает на фотоприемник PD только волну, соответствующую второму члену (1). Таким образом, в описанной поляризационной схеме резонатор пропускает свет только на своих резонансных частотах так, как если бы он работал на прохождение (рис. 2). Требуемая анизотропия в резонаторе и между поляризатором и объектом создается управителями поляризации PC_1 и PC_2 .

Линейная скорость объекта M может быть измерена следующим образом. Источник света S излучает широкий спектр, на ширине которого укладывается много резонансов кольцевого резонатора. На пути от источника к объекту резонатор вырезает из этого спектра полосы, соответствующие его резонансным линиям. Вследствие этого спектр падающего на объект излучения представляет собой набор линий, центральные частоты которых равны собственным частотам кольцевого резонатора. Если объект M движется относительно резонатора, линии в спектре отраженного от объекта света смещаются относительно линий

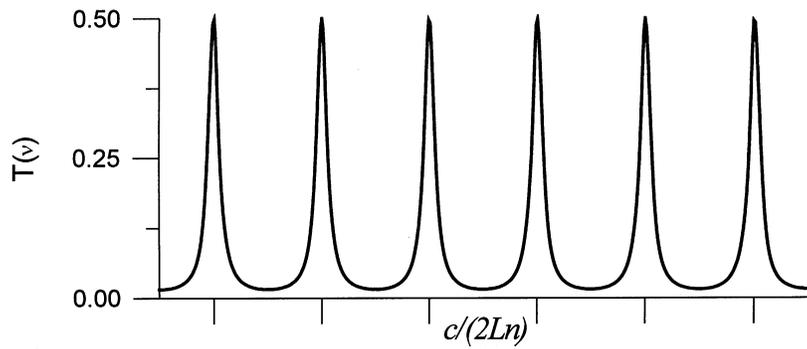


Рис. 2. Спектр пропускания кольцевого резонатора в резонансном кольцевом интерферометре в поляризационной схеме с устранением света, отраженного от кольцевого резонатора.

падающего света, т.е. относительно резонансных частот резонатора. Чтобы достичь фотоприемника PD , отраженному свету необходимо снова пройти через резонатор, однако смещенные линии отраженного света тем хуже пропускаются резонатором, чем на большую частоту они смещены. Таким образом, световая мощность, достигающая фотоприемника, зависит от величины доплеровского сдвига частоты света при отражении от объекта, т.е. от скорости объекта относительно интерферометра.

Фазовая невязанность в кольцевом резонаторе, приводящая к неравенству резонансных частот кольцевого резонатора для направлений по и против часовой стрелки, влияет на выходную мощность интерферометра точно так же, как и эффект Доплера [3,4]. Благодаря этому при модуляционных измерениях линейной скорости можно модулировать не частоту отраженного света, а фазовую невязанность в кольцевом резонаторе. Для этого могут быть использованы модуляторы фазовой невязанности на основе несимметрично расположенных взаимных фазовых модуляторов, используемые в волоконно-оптических гироскопах саньяковского типа [6]. Можно использовать также модуляторы на основе магнитооптических эффектов Фарадея и Керра и других невязанных оптических эффектов.

Выражение для световой мощности на фотоприемнике имеет следующий вид [3,4]:

$$P_{out}(\nu, \phi) = \frac{\pi}{16F} \frac{\alpha P_0}{1 + (2F/\pi)^2 \sin^2(4\pi \frac{Ln}{c} \frac{\nu}{\lambda} - \phi)}, \quad (2)$$

где

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (3)$$

— резкость кольцевого резонатора, α — коэффициент отражения объекта, P_0 — мощность источника света, L — длина кольцевого резонатора, n — его показатель преломления, ν — скорость объекта, ν_s — центральная частота источника, ϕ — фазовая невязка в резонаторе.

При измерениях модуляционным методом предельная чувствительность интерферометра в полосе 1 Hz при частоте модуляции $f_m = c/(2nL)$ (предполагается, что $F \gg 1$):

$$v_{\min} \approx \frac{3c^2}{2\pi Ln\nu_s} \left(\sqrt{\frac{h\nu_s}{\alpha P_0 F}} + \frac{(2/\pi)^{1/4}}{F^{5/2} \sqrt{\Delta\nu_s}} \right), \quad (5)$$

где $\Delta\nu_s$ — ширина спектра источника света. Первый член (5) соответствует дробовому шуму, второй — шуму биений спектральных компонент излучения на фотоприемнике [5]. При легко достижимых параметрах интерферометра $L = 100$ м, $n = 1.5$, $F = 50$, $\alpha = 1$, $P_0 = 500$ мВт, $\nu_s = 2 \cdot 10^{14}$ Hz (длина волны $1.5 \mu\text{m}$), $\Delta\nu_s = 10^{13}$ Hz (длина когерентности $30 \mu\text{m}$) минимально обнаружимая скорость объекта составляет $5 \cdot 10^{-7}$ мм/с, что соответствует доплеровскому сдвигу частоты света $7 \cdot 10^{-4}$ Hz. Это приблизительно в \sqrt{F} раз лучше, чем в интерферометре Саньяка с таким же источником света и той же длиной чувствительного контура [2]. Выигрыш в чувствительности достигается за счет использования многопроходной интерференции в кольцевом резонаторе. Приведенная оценка показывает, что при весьма скромных параметрах источника света и резонатора интерферометр позволяет измерять скорости, отвечающие доплеровским сдвигам частоты света порядка тысячных долей герца. Измерение столь медленных перемещений методами, основанными на детектировании разностной частоты, может быть связано со значительными трудностями.

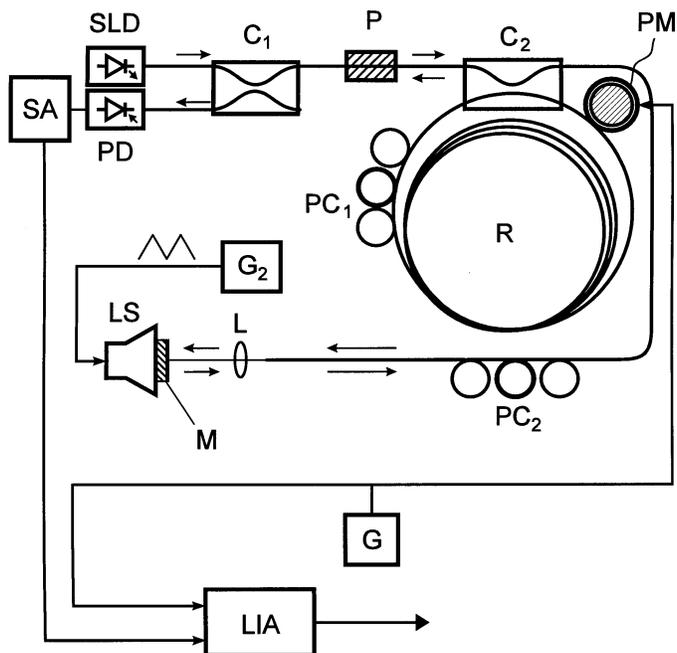


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для измерения линейной скорости: *SLD* — суперлюминесцентный диод, *C₁* — 3 dB волоконный ответвитель, *P* — поляризатор, *C₂* — волоконный ответвитель со слабой связью, *R* — кольцевой резонатор, *PM* — модулятор фазовой невязности, *G* — генератор модулирующего напряжения (частота 200 kHz), *PC₁*, *PC₂* — управители поляризации, *M* — возвращающее зеркало, *LS* — громкоговоритель, *G₂* — генератор пилообразного напряжения, *PD* — фотодиод, *SA* — селективный усилитель на частоту 200 kHz, *LIA* — синхронный детектор.

Схема экспериментальной установки для измерения линейной скорости показана на рис. 3. В эксперименте использовался полностью волоконный резонансный интерферометр на основе изотропного одномодового волокна с низкодобротным кольцевым резонатором и низкокогерентным суперлюминесцентным источником света. Длина волны источника *SLD* составляла $0.83 \mu\text{m}$, мощность — около $100 \mu\text{W}$, длина когерентности — $50 \mu\text{m}$. Длина кольцевого резонатора *R* составля-

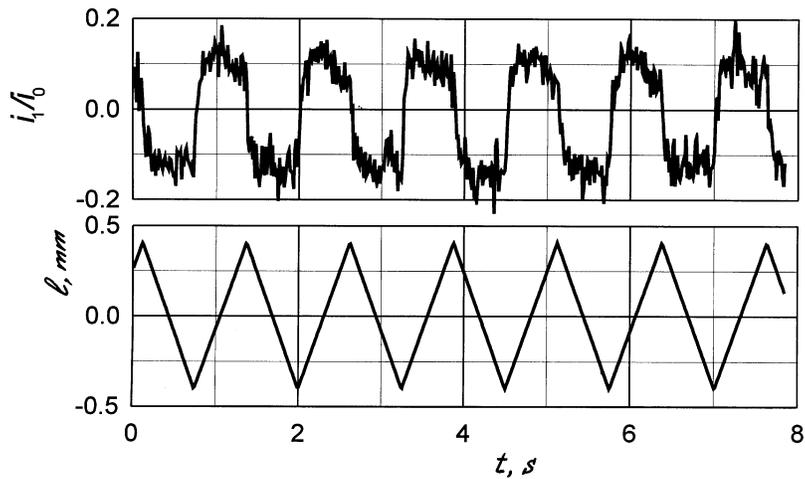


Рис. 4. Выходной сигнал интерферометра при пилообразной модуляции положения возвращающего зеркала. Верхняя кривая — сигнал на выходе синхронного детектора, i_1 — амплитуда первой гармоники фототока, i_0 — постоянная составляющая фототока. Нижняя кривая — положение возвращающего зеркала (l , mm). Постоянная времени синхронного детектора — 0.05 с.

ла 500 м. Резонатор был замкнут полированным волоконным ответвителем C_2 с коэффициентом деления 1:10. При этом коэффициенте деления резкость резонатора определялась собственными потерями в волокне (2.2 dB/km) и не превышала 1.8, так что резонатор работал в режиме, близком к однопроходному. Кольцевой резонатор был снабжен модулятором фазовой невязности, в качестве которого служил пьезооптический волоконный фазовый модулятор PM , несимметрично расположенный относительно замыкающего ответвителя C_2 . Частота модуляции была равна оптимальной $c/(2Ln) = 200$ kHz. Измеряемым объектом служило возвращающее зеркало M , закрепленное на громкоговорителе LS . Фотоприемником служил кремниевый фотодиод PD , напряжение на нагрузке которого усиливалось селективным усилителем SA , настроенным на частоту модуляции 200 kHz. Отметим, что параметры интерферометра были далеки от оптимальных, так как целью эксперимента являлась только демонстрация нового метода измерений.

Линейная скорость возвращающего зеркала измерялась по амплитуде первой гармоники частоты модуляции 200 kHz, выделявшейся синхронным детектором *LIA*. Постоянная времени синхронного детектора составляла около 0.05 s. На громкоговоритель подавалось периодическое пилообразное напряжение с генератора G_2 . Частота и амплитуда этого напряжения выбирались достаточно малыми с тем, чтобы обеспечить строгую пропорциональность между напряжением на громкоговорителе и координатой зеркала. На рис. 4 представлена запись сигнала на выходе интерферометра (верхняя кривая) при пилообразной модуляции положения возвращающего зеркала (нижняя кривая). При амплитуде колебаний 0.4 mm и периоде 1.25 s скорость зеркала составляла ± 1.3 mm/s, что соответствует доплеровскому сдвигу частоты 3.25 kHz. Видно, что выходной сигнал интерферометра пропорционален скорости зеркала. Чувствительность интерферометра определялась шумами фотоприемника и составляла приблизительно $0.1 \text{ mm}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$.

Теоретическое и экспериментальное исследование резонансного кольцевого интерферометра с низкокогерентным источником света, проведенное в настоящей работе, показывает, что этот интерферометр может быть использован для измерения линейных скоростей тел. Главное преимущество предлагаемого интерферометра перед традиционными оптическими измерителями скорости, основанными на смещении исходной и отраженной волн и измерении разностной частоты, состоит в возможности измерения очень малых скоростей, соответствующих субгерцовым доплеровским сдвигам частоты света. Привлекательной чертой низкокогерентных резонансных интерферометров является также то, что они могут быть построены полностью на хорошо разработанной технологической и элементной базе саньяковских волоконно-оптических гироскопов. Резонансные кольцевые интерферометры с низкокогерентными источниками могут быть использованы для измерения микроперемещений с характерными временами порядка или меньше периода разностной частоты, процессов роста, а также не связанных с механическим движением процессов, приводящих к сдвигу частоты света при отражении, например, изменения показателя преломления.

Авторы благодарны И.А. Андроновой за внимание к работе и Р.В. Куранову за помощь в проведении эксперимента.

Список литературы

- [1] *Tselikov A., Blake J.* // Appl. Opt. 1998. V. 37. P. 6690–6694.
- [2] *Carolan T.A., Reuben R.L.* et al. // Appl. Opt. 1997. V. 36. P. 380–385.
- [3] *Новиков М.А., Иванов В.В.* // Письма в ЖТФ. Т. 24. 1998. С. 24–29.
- [4] *Иванов В.В., Новиков М.А., Геликонов В.М.* // Квантовая электроника. 1999 (в печати).
- [5] *Рытов С.М.* Введение в статистическую радиофизику. Ч. I. М.: Наука, 1976. С. 393–395.
- [6] *Bergh R.A., Lefevre H.C., Shaw H.J.* // J. Lightwave Techn. 1984. LT-2. P. 91–107.